



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

## **Aquisição de base de dados e casamento multivista de impressões digitais fotográficas sem contato**

Natália Figueiredo Moreira

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador  
Prof. Dr. Alexandre Zaghetto

Brasília  
2018



# Dedicatória

Para a minha mãe, a quem eu devo o amor pelo conhecimento e pela leitura.

# Agradecimentos

Agradeço ao professor Alexandre Zaghetto por ter me apresentado ao mundo do processamento de imagens e por ter aceitado me orientar em um prazo tão apertado. Agradeço também à professora Cláudia Nalon, que me apoiou em todos os momentos e me aceitou como monitora e orientanda durante muito tempo.

Como não poderia deixar de ser, agradeço a minha família e amigos pela paciência e apoio durante a produção desse trabalho. Por fim, agradeço a todos os voluntários que doaram um pouquinho do seu tempo e paciência para fazer parte da nossa base de dados e, assim, tornar esse trabalho possível.



# Resumo

Para cada leitura de digital, enquanto o sensor de toque captura uma única imagem, o sensor sem toque captura três imagens a partir das quais uma quarta imagem é criada automaticamente, unindo as três vistas em uma foto única que funciona como uma panorâmica da digital. Partindo da ideia de que parte da informação é perdida ao combinarmos as três vistas em uma imagem única, esse trabalho propõe uma solução em que, ao invés de aplicarmos o algoritmo de casamento de impressões digitais diretamente à imagem panorâmica, aplica-o à cada uma das três imagens originais e, por meio de uma fórmula matemática, definida pela aplicação de um algoritmo genético, combina os três resultados em um resultado único. Para testar a eficiência dessa abordagem, comparamos os resultados obtidos com a aplicação desse mesmo algoritmo de casamento de digitais em um banco de dados composto pelas digitais panorâmicas sem contato, um banco composto somente pelas vistas centrais obtidas pelo sensor sem contato e em outro banco composto unicamente por impressões digitais recolhidas por um sensor com contato. Apesar de não ter conseguido superar o desempenho das digitais com contato ou das digitais panorâmicas geradas automaticamente, o método proposto apresentou uma taxa de erro relativamente baixa, com um ERR de 4.78% para a base de dados analisada.

**Palavras-chave:** Biometria, Impressão Digital sem Contato, Algoritmos Genéticos

# Abstract

For each fingerprint reading, while the touch-based sensor captures a single image, the contactless sensor gets three images, one for each of its cameras. A fourth image is automatically generated, joining the three views into a single panoramic view. Based on the idea that some of the information is lost when the system combines the three views into a single image, this paper proposes a solution where, instead of applying the fingerprint matching algorithm to the panoramic image, we apply it to each one of the three views and merge the response into a single result. This unified result is given by a mathematical combination, using parameters defined by a genetic algorithm. To test the efficiency of this approach, we compared the results obtained with the application of the same matching algorithm in a database composed of panoramic views, another database composed only of the central views obtained by the contactless sensor and one composed of fingerprints collected by a touch-based sensor. Although it was not able to overcome the contact-based or panoramic fingerprint performance, the proposed method presented a relatively low error rate, with an ERR of 4.78% for the analyzed database.

**Keywords:** Biometrics, Touchless Fingerprint, Genetic Algorithm

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Apresentação do Problema . . . . .	1
1.3	Solução Proposta . . . . .	2
1.4	Organização da Monografia . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1	Fundamentação Teórica . . . . .	7
2.1.1	Processamento de Imagens . . . . .	7
2.1.2	Algoritmos Genéticos . . . . .	13
2.1.3	Algoritmo de Monte Carlo . . . . .	16
2.1.4	Biometria . . . . .	17
2.1.5	Métodos de Avaliação de Sistemas Biométricos . . . . .	20
2.1.6	Classificação e validação de impressões digitais . . . . .	22
2.1.7	Impressões Digitais com e sem Contato . . . . .	29
2.2	Trabalhos Correlatos . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Solução Proposta</b>	<b>35</b>
3.1	Processamento das digitais coletadas . . . . .	35
3.1.1	Grupo 2 . . . . .	36
3.1.2	Grupo 3 . . . . .	40
3.1.3	Grupo 4 . . . . .	40
3.1.4	Grupo 5 . . . . .	42
3.1.5	Grupo 6 . . . . .	43
3.2	Detecção de minúcias e casamento entre digitais . . . . .	44
3.3	Combinação de vistas . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>48</b>
4.1	Base de Dados . . . . .	48
4.2	Combinação das vistas . . . . .	49

4.3 Algoritmo de Monte Carlo . . . . .	51
<b>5 Conclusão</b>	<b>55</b>
5.1 Hipótese 1 . . . . .	55
5.2 Hipótese 2 . . . . .	56
5.3 Hipótese 3 . . . . .	56
5.4 Hipótese 4 . . . . .	56
5.5 Considerações Finais . . . . .	56
5.6 Trabalhos Futuros . . . . .	57
<b>Referências</b>	<b>58</b>

# Lista de Figuras

1.1	Exemplo de digital capturada pelo sensor sem toque. . . . .	3
1.2	Sequência de processos realizados para a combinação das três vistas em uma única tabela. . . . .	3
1.3	Exemplos de imagens utilizadas na detecção de minúcias para os grupos 1, 2, 3 e 4 do trabalho. . . . .	5
2.1	Exemplo de equalização de histograma . . . . .	9
2.2	Exemplos de aplicação da transformada Gama . . . . .	11
2.3	Exemplo de máscara 3 x 3 para filtragem espacial. . . . .	12
2.4	Exemplo de binarização . . . . .	13
2.5	Exemplo de <i>crossover</i> entre cromossomos com três genes. . . . .	15
2.6	Sequência de fases em um algoritmo genético. . . . .	16
2.7	Comparação entre os modos de identificação e verificação em um sistema biométrico. . . . .	19
2.8	Variação das taxas de FP e FN em relação ao limiar. . . . .	21
2.9	Representação dos cumes e vales em uma impressão digital ampliada. . . .	23
2.10	Cartão de identificação de um prisioneiro utilizado na classificação pelo sistema de Henry na Penitenciária Estadual de Oklahoma, Estados Unidos, em 1935. . . . .	24
2.11	Exemplos de classes utilizadas na classificação de digitais. Todas as imagens foram retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho. . .	26
2.12	Identificação dos núcleos e deltas em uma digital. . . . .	27
2.13	Exemplos das minúcias mais comuns encontradas em impressões digitais. Todas as imagens foram retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho. . . . .	28
2.14	Exemplos de sensores utilizados na captura de digitais sem contato. . . . .	29
2.15	Exemplos de digitais de um mesmo dedo capturadas sob pressão diferente em um sensor de digitais com toque. . . . .	30
2.16	Exemplos de digitais com falhas capturadas utilizando-se sensores de digitais com contato. . . . .	31

2.17	Exemplos de sensores utilizados na captura de digitais sem contato. . . . .	32
2.18	Exemplos de uma mesma digital capturada com tecnologia sem e com contato. Perceba como a digital (a) apresenta uma área útil menor em comparação à digital (b). Imagens retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho. . . . .	33
3.1	Fluxograma de passos à serem seguidos no processamento das digitais do Grupo 2. . . . .	36
3.2	Exemplo de aplicação do histograma local em uma imagem do Grupo 2. . .	37
3.3	Aplicação da correção gama à Figura 3.2b. . . . .	37
3.4	Exemplo das quatro imagens pós filtragem gaussiana obtidas a partir da Figura 3.3. . . . .	38
3.5	Exemplo das quatro imagens pós binarização obtidas a partir da Figura 3.4. . . . .	39
3.6	Comparação entre a imagem original e a imagem final obtida após o processamento apresentado na Figura 3.1. . . . .	39
3.7	Exemplo de imagem captura originalmente para o Grupo 3 e da sua imagem processada correspondente de saída. . . . .	40
3.8	Exemplo de imagem processada para o Grupo 3 e o seu equivalente pós-recorte para o Grupo 4. . . . .	41
3.9	Exemplo das três vistas originais para uma mesma digital e o seu equivalente pós-processamento para o Grupo 5. . . . .	42
3.10	Exemplo dos equivalentes para o Grupo 6 das três vistas processadas na Figura 3.9. . . . .	43
3.11	Esquemático de passos à serem seguidos na avaliação das digitais em um grupo. . . . .	44
3.12	Representação do processo de combinação das tabelas de casamento das três vistas em uma tabela única. . . . .	46
3.13	Representação dos dois tipos possíveis de <i>crossover</i> , partindo-se de cromossomos pais com três genes. . . . .	47
4.1	Sensores utilizados na coleta da base de dados . . . . .	49
4.2	Sensores utilizados na coleta da base de dados . . . . .	50
4.3	Representação do casamento horizontal e vertical no algoritmo de Monte Carlo utilizado. . . . .	53
4.4	Gráficos gerados pela aplicação do algoritmo de Monte Carlo à cada grupo. . . . .	54
5.1	Exemplos de digitais em que uma definição errada do centro gerou um recorte de baixa qualidade. . . . .	57

# Lista de Tabelas

4.1	Pesos obtidos pela aplicação do algoritmo genético para os grupos 5 e 6.. . .	51
4.2	Resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Monte Carlo para cada um dos seis grupos previamente definidos. . . . .	53
4.3	Resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Monte Carlo à cada uma das vistas separadamente. . . . .	53

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Em um cenário em que segurança e privacidade são cada vez mais valorizadas, o uso de tecnologias biométricas menos fraudáveis, com baixo custo de manutenção e de fácil aplicação no dia a dia tem sido tema de debates e pesquisas. Em decorrência disso, as aplicações biométricas tem evoluído rapidamente, e hoje já é possível, até mesmo, identificar pessoas pelos seu rosto em vídeo, íris, timbre da voz, forma de andar e outras características corporais.

Por seu baixo custo de implementação e sua alta confiabilidade, a identificação de pessoas pelas suas impressões digitais continua sendo uma das áreas mais estudada no ramo da biometria. Longe de se encontrar estagnado, o uso de impressões digitais para reconhecimento biométrico tem crescido e hoje encontramos esse tipo de tecnologia em caixas de banco, trancas de porta e, até mesmo, em vários celulares modernos.

### 1.2 Apresentação do Problema

Atualmente, na maioria dos sistemas, a aquisição de impressões digitais é feita através de sensores com contato, ou seja, para ter sua digital coletada, o usuário pressiona o dedo sobre uma superfície que captura, identifica e armazena a digital para análise de correspondência em um banco de dados. Nesse cenário, o sensor de entrada em uma empresa, por exemplo, será manuseado por várias pessoas diferentes diariamente, gerando desgaste físicos no aparelho e demandando manutenção frequente. Além disso, as distorções causada pela diferença de posicionamento, pressão, umidade e suor na digital podem distorcer a imagem capturada e dificultar o reconhecimento da digital.

Visando solucionar esses problemas, alguns sistemas de captura de impressões digitais sem contato tem ganhado espaço no mercado. Esses equipamentos não precisam ser ma-



nuseados diretamente pelo usuário e produzem impressões digitais mais consistentes, sem as distorções comuns aos leitores com toque. Esses sistemas de captura de digitais também costumam privilegiar aspectos de higiene já que evitam o contato de várias pessoas com a mesma superfície, como ocorre na aquisição de digitais utilizando-se sistemas com toque.

## 1.3 Solução Proposta

Nesse trabalho, propomos a comparação de desempenho entre seis grupos de digitais e sistemas de verificação distintos, dos quais cinco foram coletados utilizando-se um sensor sem contato e um foi coletado pelo sensor tradicional com contato.

Enquanto o sensor com contato captura uma única imagem da digital, o sensor multivista sem contato captura três imagens (uma para cada uma das suas três câmeras) e monta uma nova imagem, que é uma junção das três, como em uma foto panorâmica. Nesse trabalho, chamaremos essa imagem de planejada e as três imagens originais de vistas.

Um exemplo de três vistas capturadas para uma digital e da vista planejada correspondente é apresentando na Figura 1.1.

Apesar de útil, a imagem panorâmica gerada pelo *driver* do sensor sem contato nem sempre apresenta uma boa qualidade, podendo ficar muito escura ou distorcida dependendo do formato e do posicionamento do dedo. Além disso, uma grande quantidade de informação, principalmente das vistas laterais, é descartada durante a criação dessa vista planejada.

Partindo do princípio de que o aproveitamento de toda a informação constante das três vistas pode melhorar a eficácia do sistema, esse trabalho propõe uma forma diferente de combinação dessas vistas. Por essa abordagem, ao invés de criarmos uma imagem única, como no caso da vista planejada, aplicamos o algoritmo de casamento à cada uma das vistas individualmente e combinamos os resultados através de uma fórmula matemática. Nesse caso, a análise final dependerá de uma soma ponderada das três vistas. A formação dessa fórmula e a escolha dos pesos que a compõem serão explicadas na Sessão 3.3 desse trabalho.

O esquemático da Figura 1.2 exemplifica esse processo. Observe que nele cada vista é processada individualmente e somente após a detecção de suas minúcias e casamento com outras imagens do banco as três respostas são combinadas em uma resposta única.

Nesse trabalho, testaremos também uma variação dessa abordagem em que, ao invés de considerarmos toda a digital nas três vistas coletadas, consideraremos somente uma faixa

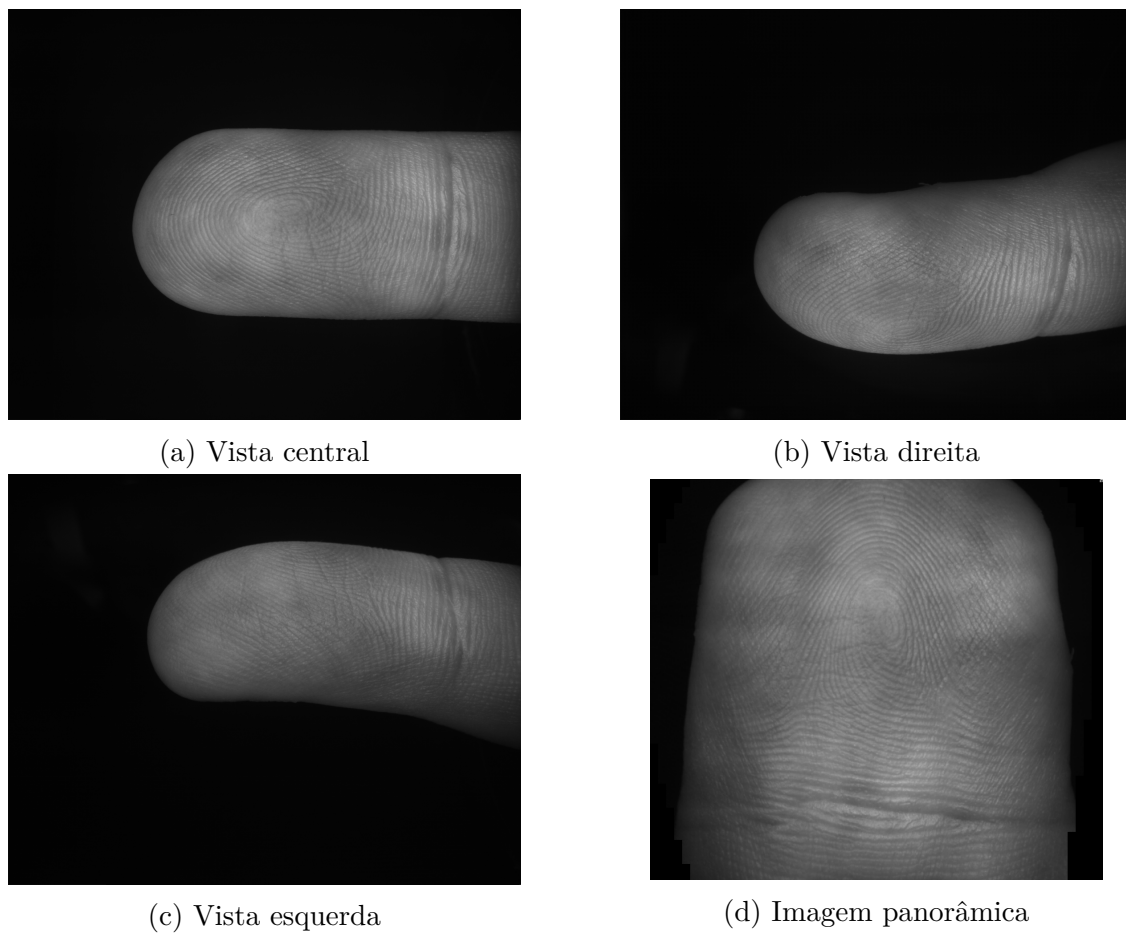


Figura 1.1: Exemplo de digital capturada pelo sensor sem toque.

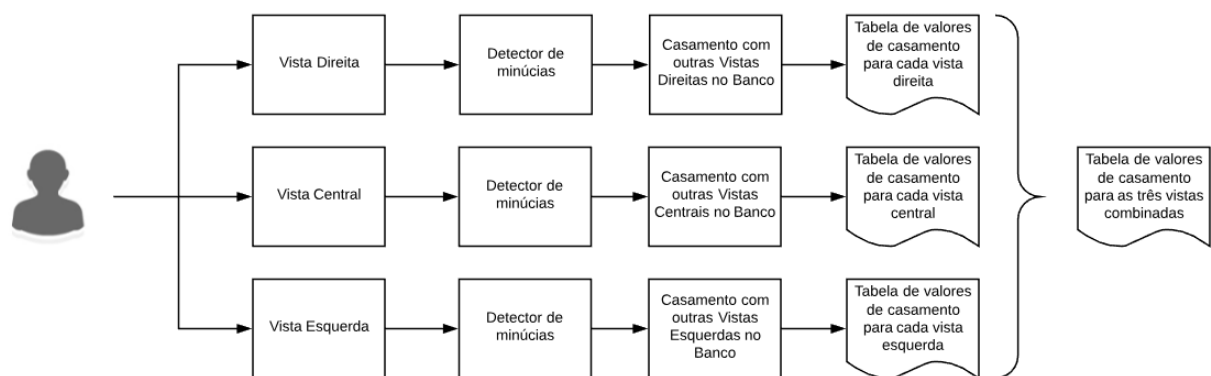


Figura 1.2: Sequência de processos realizados para a combinação das três vistas em uma única tabela.

de interesse em cada digital. A ideia por trás disso é evitar as áreas de baixa qualidade nas bordas da imagem, dando destaque para o centro, onde a digital é mais visível.

Com esses conceitos definidos, podemos dividir os seis grupos de digitais considerados e comparados nesse trabalho como sendo:

- **Grupo 1:** Composto pelas digitais capturadas pelo sensor de digitais com contato.
- **Grupo 2:** Composto pelas digitais planificadas geradas automaticamente pelo *driver* utilizado na aquisição de impressões digitais sem contato.
- **Grupo 3:** Composto pelas vistas centrais das digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato.
- **Grupo 4:** Composto pelas vistas centrais das digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos o recorte das digitais, privilegiando a área de interesse.
- **Grupo 5:** Composto pelas três vistas capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos a combinação matemática das três vistas.
- **Grupo 6:** Composto pelas três vistas capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos a combinação matemática das três vistas e, também, o recorte das digitais, privilegiando a área de interesse.

Podemos pensar em cada grupo como sendo um subconjunto do banco de dados coletado nesse trabalho. Para cada um dos seis grupos, definiremos procedimentos de pré-processamento das imagens distintos. Esses procedimentos serão explicados nas Sessões 3.1 e 3.3 desse trabalho.

Para facilitar a visualização das diferenças entre os grupos, a Figura 1.3 apresenta um exemplo de imagem utilizada como entrada para a detecção de minúcias nos grupos 1, 2, 3 e 4. As imagens referentes aos grupos 5 e 6 podem ser obtidas pela simples aplicação das técnicas utilizadas nos grupos 3 e 4 às três vistas disponíveis.

Após a formação e avaliação dos resultados obtidos com os casamentos de digitais para cada um dos seis grupos, esperamos possuir dados suficientes para validar ou refutar as seguintes hipóteses:

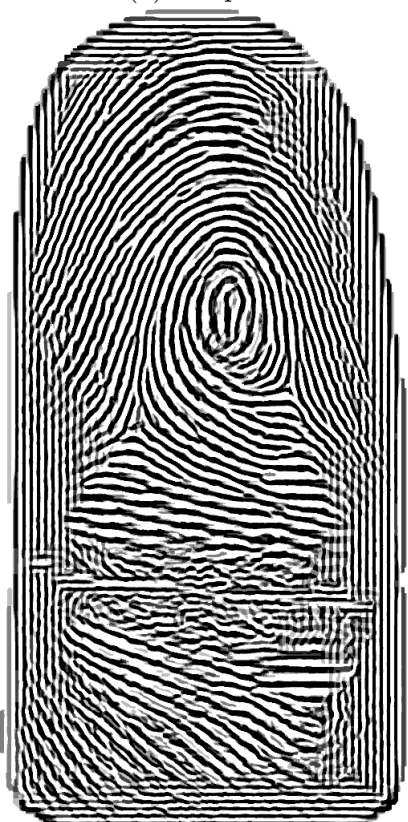
1. Algum dos grupos formados pelas digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato (Grupos 2, 3, 4, 5 e 6) possui desempenho melhor do que o Grupo 1.
2. Os Grupos 5 e 6 geram resultados melhores que, respectivamente, os Grupos 3 e 4.
3. Os Grupos 4 e 6 produzem desempenho melhor do que, respectivamente, os Grupos 3 e 5.
4. O Grupo 6 obtém desempenho melhor do que o Grupo 2.



(a) Grupo 1



(b) Grupo 2



(c) Grupo 3



(d) Grupo 4

Figura 1.3: Exemplos de imagens utilizadas na detecção de minúcias para os grupos 1, 2, 3 e 4 do trabalho.

## 1.4 Organização da Monografia

O Capítulo 2 desse trabalho abrange os conceitos necessários para a correta compreensão dos métodos utilizados e soluções apresentadas. A partir da leitura dele, o leitor terá uma visão geral dos conceitos que regem a área da biometria atual e, mais especificamente, da leitura e utilização de impressões digitais no reconhecimento de identidades. Além disso, o Capítulo 2 apresenta também algumas técnicas de processamento de imagens, utilizadas no tratamento das impressões digitais coletadas e uma breve descrição do que são e como funcionam os algoritmos genéticos.

No Capítulo 3, o leitor será apresentado à metodologia empregada na comparação dos grupos, às etapas do processamento das digitais de cada grupo e como se dá a combinação das três vistas em um resultado único. Em seguida, o Capítulo 4 apresentará a rotina utilizada na criação da base de dados de digitais e como foi feita a avaliação dos grupos descritos, apresentando, também, os resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 disporá as conclusões obtidas, apresentando respostas para as quatro perguntas apresentadas na Sessão 1.3 desse trabalho. Ao final desse capítulo, enumeraremos também as possibilidades de melhoria e de trabalhos futuros, baseando-nos, para isso, nos resultados obtidos e nas dificuldades encontradas durante a produção do sistema.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Fundamentação Teórica

Antes de nos aprofundarmos nos algoritmos e técnicas utilizadas nesse trabalho, é preciso que o leitor esteja familiarizado com alguns conceitos essenciais. Esse capítulo tem, portanto, o objetivo de introduzir ao leitor os conceitos necessários ao correto entendimento dos métodos utilizados na resolução do problema proposto, apresentados no Capítulo 3.

#### 2.1.1 Processamento de Imagens

Segundo [1] podemos definir uma imagem como sendo uma função bi-dimensional  $f(x, y)$  que recebe um par de coordenadas espaciais ( $x$  e  $y$ ) e retorna um valor definido de nível de cinza naquele ponto. Quando os valores possíveis para  $x$ ,  $y$  e  $f$  são finitos e discretos, temos uma imagem digital.

Em termos mais simples, podemos dizer que uma imagem digital nada mais é do que um plano bem definido coberto por pontos com tonalidades diferentes de cinza, os chamados *pixels*. Na maioria das imagens digitais em escala de cinza, cada nível possível de cinza é representado por um número inteiro entre 0 e 255, em que 0 representa o nível mais escuro (preto) e 255 o nível mais claro (branco), ou por um número real entre 0 e 1, aonde 0 corresponde ao nível mais escuro (preto) e 1 representa o nível mais claro (branco). Essa representação de uma imagem digitalmente como uma matriz de números permite ao computador realizar operações sobre a imagem, ressaltando aspectos importantes, retirando informações ou modificando-a quando necessário.

Em aplicações reais, as imagens digitais capturadas por sensores físicos - como câmeras, sensores de raio-x, infravermelho, dentre outros - frequentemente precisam ser pré-processadas antes de serem utilizadas, seja pela baixa qualidade da imagem capturada, seja para ressaltar informações que não seriam visíveis de outra forma. A seguir,

encontram-se algumas das técnicas aplicadas no pré-processamento das imagens utilizadas nesse trabalho.

**Equalização de Histograma** : uma das ferramentas mais utilizadas no processamento de imagens digitais é a equalização de histogramas. Um histograma, como descrito em [2] é uma representação gráfica da frequência de ocorrência de cada possível nível de cinza em uma imagem. Em termos matemáticos, podemos definir o histograma de uma imagem como sendo uma função uni-dimensional dada pela Equação 2.1.

$$H_f(k) = j \quad (2.1)$$

Aonde  $k$  corresponde ao  $k$ -ésimo nível de cinza e  $j$  corresponde à quantidade de *pixels* que possuem esse nível de cinza na imagem  $f$ .

Em muitas aplicações, é interessante utilizar, ao invés do histograma padrão, um histograma normalizado. Esse tipo de histograma é dado pela Equação 2.2.

$$P(k) = \frac{H_f(k)}{n} \quad (2.2)$$

Em que  $n$  é igual a quantidade total de *pixels* na imagem. Nesse caso, a função  $P(k)$  representa a distribuição de probabilidade de ocorrência de cada nível de cinza na imagem e pode variar entre 0 e 1.

Somente observando seu histograma é possível descobrir se uma imagem é muito escura (as barras tendem a ficar concentradas na parte esquerda do histograma) ou muito clara (nesse caso, o histograma tende a ficar deslocado para a direita). Imagens que possuem histogramas concentrados, ou seja, em que os valores de níveis de cinza de seus *pixels* ficam restritos à uma pequena faixa de valores, terão uma aparência desbotada devido ao baixo contraste de seus *pixels*.

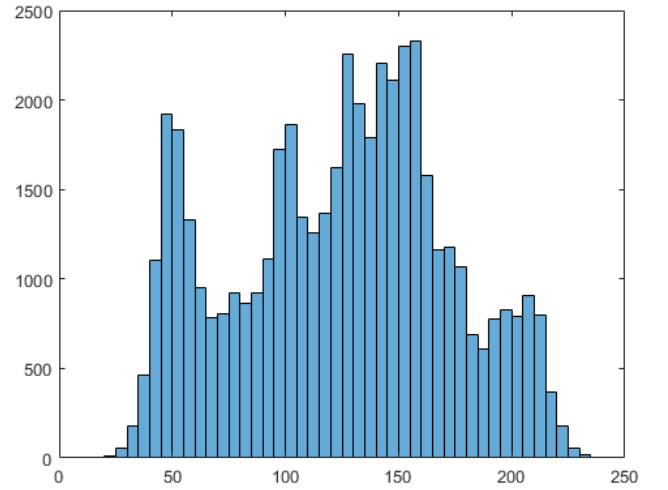
A equalização de histograma é uma operação utilizada para solucionar esse problema, realçando detalhes e melhorando o contraste em imagens com muita ou pouca luminosidade. A ideia por trás da equalização de histogramas é reorganizar os valores dos *pixels* de forma a se obter um histograma mais uniforme, ou seja, um histograma em que os *pixels* estejam uniformemente distribuídos ao longo de toda a faixa de valores de níveis de cinza possíveis. Essa reorganização é feita aplicando-se uma fórmula do tipo descrito na Equação 2.3, com  $p_r(\phi)$  sendo a Função de Densidade de Probabilidade (FDP) para cada nível de cinza e  $r$  sendo igual ao maior valor possível de nível de cinza.

$$s = \tau(r) = \int_0^r p_r(\phi) d\phi \quad (2.3)$$

A figura 2.1 apresenta, como exemplo, uma figura em nível de cinza simples, o seu histograma calculado, o resultado da aplicação da equalização de histograma nessa imagem e o novo histograma calculado após a equalização.



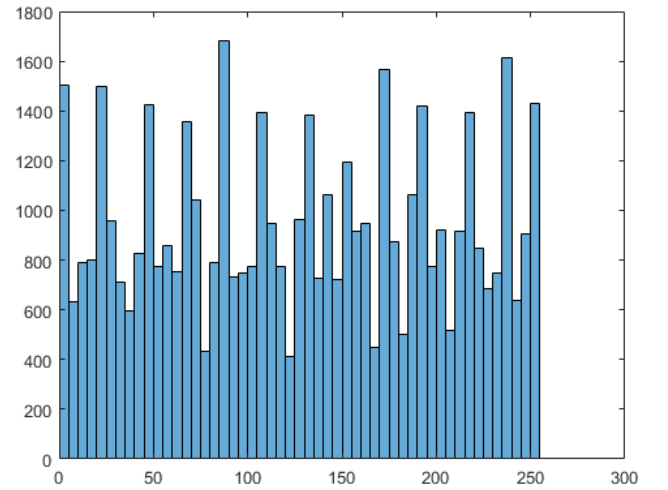
(a) Imagem Original



(b) Histograma calculado a partir da imagem original



(c) Imagem equalizada



(d) Histograma calculado a partir da imagem equalizada

Figura 2.1: Exemplo de equalização de histograma



**Transformação Gama** : muitos sistemas que coletam ou reproduzem imagens, como monitores e câmeras, tendem a produzir imagens digitais que parecem muito escuras ou muito claras ao observador. Isso acontece porque a relação entre a luminosidade do ambiente e a luminosidade captada digitalmente dificilmente é linear, ou seja, nem sempre um grande aumento na luminosidade do ambiente se reflete em um grande aumento da luminosidade captada e vice-versa. Em muitos casos, isso resulta em imagens escuras ou claras demais, que parecem estranhas ao olho nu. Para corrigir essas variações de luminosidade, aplicamos uma técnica conhecida como correção gama.

A correção gama nada mais é do que uma fórmula matemática, descrita pela Equação 2.4. Nessa fórmula  $c$  e  $\gamma$  são duas constantes positivas,  $I$  corresponde a imagem original e  $I_\gamma$  é a imagem corrigida.

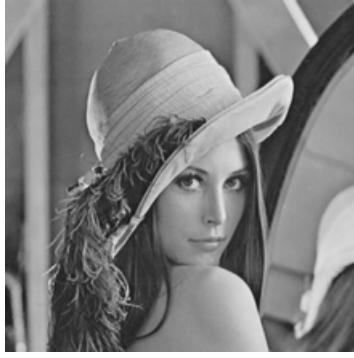
$$I_\gamma = c \times I^\gamma \quad (2.4)$$

A aplicação da correção gama, para os valores de gama 0.4 e 2.5, está exemplificada na Figura 2.2. Note que uma transformação gama com um gama de valor 1 não altera a imagem original, enquanto gamas maiores e menores que 1 tendem a, respectivamente, escurecer e clarear a imagem final.

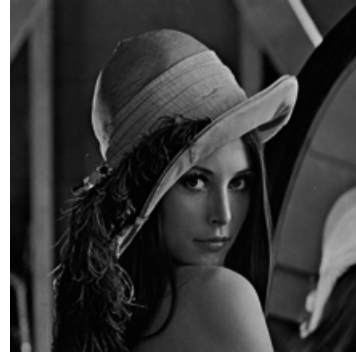
A aplicação da correção gama em uma imagem faz com que os valores de níveis de cinza da imagem se aproximem dos valores reais percebidos pelo olho humano. Para isso, a transformação gama aplicada à imagem deve ter uma curva inversa à luminosidade percebida pelo dispositivo. Utilizando o exemplo da Figura 2.2, para obtermos a Figura 2.2a a partir da Figura 2.2b, seria necessário utilizar um transformada com um valor para gama de 0.4 e não de 2.5.

**Filtro *Gaussiano*** : em processamento de imagens, chamamos de filtragem espacial o processo de convolução de uma imagem com uma pequena matriz de pesos, chamada de filtro ou máscara. Imagens digitais que refletem elementos reais, como é o caso das imagens geradas por câmeras, estão constantemente sujeitas à distorções e interferências externas, que prejudicam a qualidade da imagem e dificultam a coleta de informações a partir dela. A filtragem espacial com o filtro correto ajuda a eliminar essas distorções, melhorando a qualidade da imagem e facilitando o seu processamento.

No processo de convolução, o valor de cada *pixel* na nova imagem é calculado utilizando-se os seus vizinhos, seguindo os pesos descritos na máscara. Nesse caso, é como se a máscara fosse "caminhando" pela imagem, *pixel* a *pixel*, aplicando seus



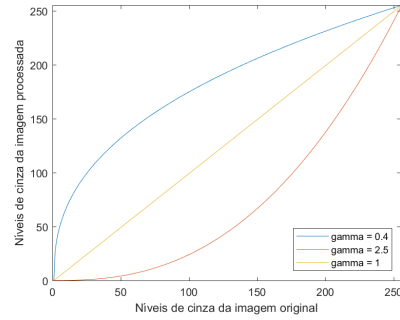
(a) Imagem original (Gama = 1)



(b) Imagem transformada para Gama = 2.5



(c) Imagem transformada para Gama = 0.4



(d) Curvas para valores diversos de gama

Figura 2.2: Exemplos de aplicação da transformada Gama

pesos aos *pixels* abaixo dela. Para uma máscara de 3 x 3, como a descrita na Figura 2.3, o valor filtrado para um *pixel* localizado na linha  $i$  e na coluna  $j$  da nova imagem é dado pela Equação 2.5.

$$h[i, j] = A \cdot I1 + B \cdot I2 + C \cdot I3 + D \cdot I4 + E \cdot I5 + F \cdot I6 + G \cdot I7 + H \cdot I8 + I \cdot I9 \quad (2.5)$$

Para imagens capturadas por câmeras, é comum a aplicação de um filtro *Gaussiano*, já que esse filtro, como o nome sugere, é utilizado para eliminar ruídos do tipo gaussiano, os mais encontrados em imagens produzidas por câmeras digitais. Nesse filtro, e em imagens bidimensionais como as que trabalhamos, os pesos são definidos pela distribuição gaussiana, dada pela Equação 2.6, em que a variável  $\sigma$  define o quão amplo ou estreito o filtro será. Nessa equação  $g(i, j)$  corresponde ao valor do filtro para a posição de linha  $i$  e coluna  $j$  da máscara.

$$g(i, j) = e^{-\frac{(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

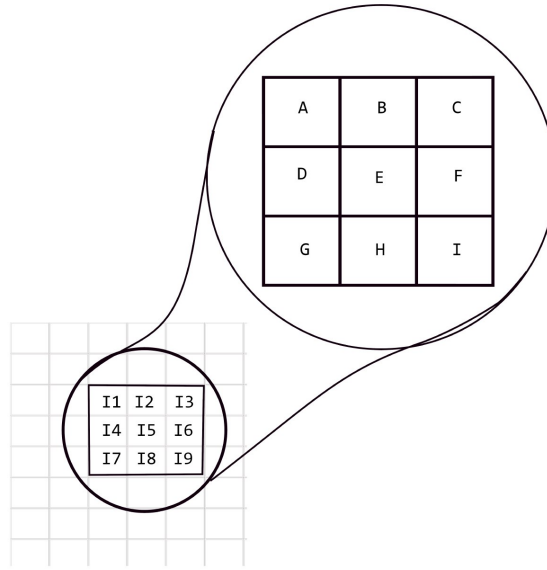


Figura 2.3: Exemplo de máscara 3 x 3 para filtragem espacial.

É importante notar que o tamanho da máscara utilizada influencia diretamente no resultado esperado. Uma máscara maior resultará em uma imagem com menos ruído, mas tornará a imagem mais "borrada", ou seja, acabará distorcendo as bordas. Analogamente, uma máscara menor preserva a qualidade da imagem, porém diminui a capacidade de filtragem.

**Binarização de imagens** : chamamos de imagem binária aquela que possui somente dois níveis de cinza: branco e preto. Podemos conseguir uma imagem binária a partir de qualquer imagem digital em escala de cinza, basta definir um limiar de corte. A partir daí, todos os *pixels* com nível de cinza acima do limiar de corte passam a representar preto (representado pelo nível 0 em uma imagem binária) e todos os *pixels* com nível de cinza abaixo do limiar passam a ser branco (representado pelo nível 1). Essa transformação é descrita em [2] pela Equação 2.7.

$$g(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } f(n) \geq T \\ 1 & \text{if } f(n) < T \end{cases} \quad (2.7)$$

Dependendo da aplicação, pode ser complicado definir um limiar adequado manualmente. Nesse caso, existem métodos que ajudam na escolha de um bom limiar para a binarização da imagem como, por exemplo, o método de Otsu. Nesse método, o computador calcula a variância de nível de cinza para *pixels* brancos e pretos para vários limiares e escolhe o valor de limiar em que essa variância é mínima. A Fi-

gura 2.4 contém um exemplo de imagem binarizada utilizando-se o limiar definido pelo método de Otsu.



Figura 2.4: Exemplo de binarização

### 2.1.2 Algoritmos Genéticos

Quando modelamos problemas computacionais é comum trabalharmos com algoritmos que, ao receber um conjunto de  $n$  variáveis de entrada  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  realiza algum tipo de processamento e retorna um conjunto de  $m$  variáveis de saída  $(y_1, y_2, \dots, y_m)$ . Nesse caso, segundo [3], o conjunto de todos os possíveis subconjuntos de valores de  $x$  é chamado de espaço de domínio, enquanto o conjunto de todos os possíveis subconjuntos de valores  $y$  é chamado de espaço de solução.

Em um cenário ideal, ao receber um subconjunto pertencente ao domínio, um algoritmo sempre será capaz de apresentar uma resposta ideal. Esse é o caso de, por exemplo, algoritmos que aplicam fórmulas matemáticas aos valores de entrada, gerando valores de saída bem definidos. Nesse caso, só existe uma solução possível e ela é facilmente encontrada pela aplicação de fórmulas pré-estabelecidas.

Agora, imagine que, ao invés de calcular a saída diretamente, o programa precise verificar, dentre todos os subconjuntos definidos no espaço de solução, o subconjunto que apresenta a melhor resposta às variáveis de entrada. Isso significaria testar individual-

mente cada possível saída e, só então, chegar a uma resposta. Em situações reais, em que o espaço de solução é muito grande, isso se torna inviável.

Para solucionar problemas como esse, podemos aplicar algoritmos que limitam o espaço de solução a ser pesquisado. Nesse caso, ao invés de testar todos os subconjuntos possíveis, o programa aplica regras para limitar o conjunto de possíveis soluções, tornando a busca mais fácil. Um exemplo de algoritmo desse tipo são os algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos são algoritmos projetados para simular a evolução de uma população de indivíduos, como descrita por Charles Darwin em seu livro "A Origem das Espécies". Nesses algoritmos, assim como na evolução natural, temos uma população inicial que muda e se adapta para ser melhor à cada nova geração.

Nos algoritmos genéticos, cada conjunto de possíveis soluções (representado pelo vetor  $(y_1, y_2, \dots, y_m)$  para  $m$  variáveis de saída) é um indivíduo, chamado de cromossomo. Analogamente, cada variável  $y$  de um cromossomo recebe o nome de gene. A um conjunto de indivíduos é dado o nome de população.

Para selecionar os melhores indivíduos, é necessário definir uma função de aptidão que deve ser capaz de medir o quão apto um determinado cromossomo é à sobrevivência. Essa função servirá de critério para a seleção dos indivíduos mais adaptados para a composição da próxima geração de indivíduos.

Em uma população de indivíduos, ocorrem as seguintes ações:

1. Seleção: pelo processo de seleção, ocorre a aplicação da função de aptidão aos indivíduos de uma população e, a partir dos resultados, uma parcela mais adaptada da população é escolhida para compor a próxima geração do processo, enquanto o restante (indivíduos menos adaptados) é descartado.
2. *Crossover*: processo pelo qual dois cromossomos, chamados de pais, se combinam, levando a geração de dois novos cromossomos filhos. O processo de *Crossover* está exemplificado na figura 2.5.
3. Mutação: nesse processo, ocorre a mutação aleatória de um gene em um cromossomo, gerando um filho por mutação, que passa a ter um novo valor para esse gene, sorteado aleatoriamente.

Para a execução de um algoritmo genético é preciso uma população inicial de indivíduos (escolhidos aleatoriamente entre os subconjuntos pertencentes ao espaço de solução do problema), uma função de aptidão e um critério de parada, que pode ser, por exemplo, uma medida da variação entre os indivíduos, o tempo de execução total pré-estabelecido ou o número de gerações que se deseja simular.

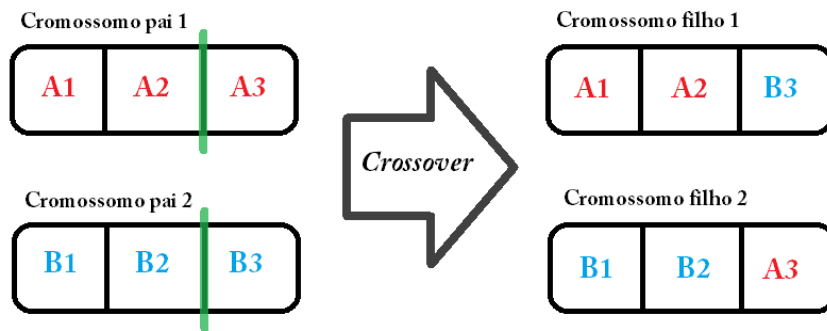


Figura 2.5: Exemplo de *crossover* entre cromossomos com três genes.

É importante salientar que algoritmos genéticos nem sempre chegam a melhor solução possível para um problema mas tendem a convergir para uma boa solução dentro da população considerada.

Segundo [4], enquanto o critério de parada não for satisfeito, o algoritmo genético deve:

1. Gerar uma população inicial de indivíduos, escolhidos aleatoriamente entre o conjunto de todos os possíveis cromossomos.
2. Avaliar cada indivíduo da população utilizando-se a função de aptidão.
3. Escolher os indivíduos mais aptos para fazerem parte da nova população como cromossomos pais.
4. Produzir, através do *crossover* de pares de cromossomos pais, filhos para compor a nova geração de indivíduos.
5. Produzir, através de mutação, os indivíduos restantes para a composição da nova geração.
6. Substituir a população atual com os cromossomos pais selecionados e os cromossomos filhos gerados nos passos 4 e 5.
7. Se o critério de parada não for satisfeito, retornar ao passo 2.

Em algoritmos genéticos, mutações adicionam variabilidade e, sem elas, não seria possível encontrar soluções contendo genes que não estavam presentes na população inicial. Não existe, no entanto, um padrão fixo de quantas mutações precisam ocorrer em cada geração de uma população. A Figura 2.6 ilustra a execução de um algoritmo genético simples.

Ainda de acordo com [3], existem quatro questões que precisam ser respondidas antes de se implementar um algoritmo genético. São elas:

- Como modelar o problema a ser resolvido em um algoritmo genético. Quais serão os genes a serem utilizados e como os cromossomos serão construídos?
- Qual será o tamanho da população considerada?
- Como será o *crossover* entre indivíduos?
- Como e quando as mutações deverão ocorrer?

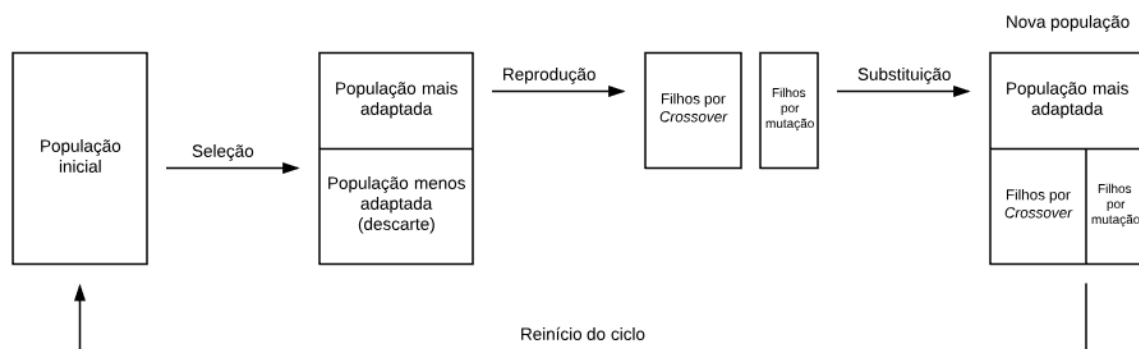


Figura 2.6: Sequência de fases em um algoritmo genético.

### 2.1.3 Algoritmo de Monte Carlo

Chamamos de algoritmo de Monte Carlo qualquer algoritmo que trabalhe com variáveis aleatórias e que possa, com uma probabilidade normalmente baixa, gerar um resultado incorreto.

Pode não parecer uma boa ideia à princípio, mas algoritmos de Monte Carlo são, geralmente, utilizados para resolver problemas que, de outra forma, seriam muito difíceis de resolver computacionalmente.

Em um algoritmo de Monte Carlo, cada execução pode produzir um resultado diferente e, para minimizar essa taxa de erro, é comum que o algoritmo seja executado múltiplas vezes, respeitando-se, claro, um tempo de execução aceitável para a aplicação. Ao considerar vários resultados, evita-se que um único resultado errado influencie fortemente o resultado geral do algoritmo [5].

## 2.1.4 Biometria

Segundo [6], podemos definir autenticação biométrica como sendo o reconhecimento automatizado de um indivíduo através de suas características fisiológicas ou comportamentais. A biometria trata, portanto, do uso de máquinas para a identificação de pessoas através de seus traços físicos ou de sua forma de agir.

As aplicações da Biometria são muitas e distintas e hoje já existem sistemas capazes de identificar usuários pelo reconhecimento da íris, voz, face, caligrafia, impressão digital ou geometria da mão. Além disso, novos sistemas estão sendo pesquisados, utilizando-se de características físicas e comportamentais até então inexploradas. Nem todos os atributos físicos e comportamentais, no entanto, funcionam bem como parâmetros de entrada na identificação biométrica. Para [7] e [8], uma boa característica biométrica deve ser:

- **Robusta:** não pode sofrer grandes alterações com o passar do tempo.
- **Distinta:** deve variar dentro de uma mesma população e ser única para cada indivíduo. Em outras palavras, todos devem possuí-la e dois indivíduos diferentes não devem apresentar características idênticas.
- **Disponível:** idealmente, deve ser possível a coleta da característica em mais de um ponto do corpo. Isso evita que pessoas com alguma deficiência física fiquem impossibilitadas de utilizar o sistema.
- **Acessível:** deve ser facilmente coletada através de sensores eletrônicos, com boa performance e em tempo hábil.
- **Aceitável:** a medida deve ser feita de forma não invasiva, ou seja, não deve gerar reclamações ou desconforto no usuário.

Com uma boa característica biométrica definida, chamamos de sistema biométrico qualquer sistema que colete essa característica, extraia informações dela e compare as informações obtidas com outras armazenadas em seu banco de dados. Esse tipo de sistema pode ser dividido em quatro módulos distintos: sensor, módulo de extração das características, banco de dados e módulo de casamento de biometrias.

O sensor corresponde à parte física do sistema, ou seja, ao maquinário utilizado na coleta da informação biométrica do usuário. Esse sensor pode ser, por exemplo, uma câmera, no caso da identificação por íris ou rosto, ou um microfone, no caso de identificação por timbre de voz.

Após a coleta, a biometria é encaminhada para o módulo de extração de características, que realiza os pré-processamentos necessários e extrai todas as informações necessárias



para a sua identificação posterior. Caso o sistema esteja funcionando em modo de cadastramento de biometrias, as informações recolhidas são encaminhadas para o banco de dados e ficam armazenadas como um modelo, também chamado de *template*, do usuário. Posteriormente, esse modelo servirá como base de análise para considerar que uma biometria seja ou não desse indivíduo.

O último módulo, chamado de módulo de casamento de biometrias contém um algoritmo capaz de comparar dois modelos e medir o quão similares eles são. Esse módulo é utilizado quando se deseja comparar uma biometria recém coletada com outras previamente armazenadas no banco de dados. Após a comparação, o algoritmo deve retornar um valor numérico que reflita a similaridade entre as duas biometrias. O módulo deve, então, decidir se esse valor é suficiente para confirmar ou não a identidade do usuário.

Nesse contexto, os sistemas biométricos podem ainda funcionar em dois modos distintos: verificação e identificação.

Sistemas de verificação são todos aqueles que verificam a identidade de uma pessoa, ou seja, o usuário primeiramente se identifica e, a partir da captura de sua biometria, o sistema compara as informações de entrada com os modelos armazenados no banco de dados para definir se o usuário é quem diz ser. Nesse modo o sistema utiliza a informação de um único indivíduo previamente cadastrado para fazer a validação e retorna "positivo" caso a validação seja correta ou "negativo" caso a validação falhe. Esse é o tipo de sistema utilizado em caixas de banco, sensores de digital em celulares e reconhecimento de assinaturas, por exemplo.

No modo de identificação, por outro lado, o sistema não conhece previamente a identidade do usuário e tem por objetivo encontra-la no banco de dados. Nesse caso, a biometria capturada é comparada com a de todos os usuários cadastrados, individualmente. Ao final dessa checagem, o sistema deve informar a identidade do usuário, caso ela tenha sido encontrada no banco, ou uma mensagem de "usuário não encontrado" caso contrário. Esse sistema é utilizado, por exemplo, na identificação de suspeitos pelas digitais coletadas em cenas de crime. A Figura 2.7 compara os dois modos de funcionamento.

Em termos matemáticos, a validação de um usuário através de um sistema de verificação se traduz na Equação 2.8. Nela,  $I$  corresponde à identidade informada pelo usuário,  $X_q$  faz referência à biometria coletada para análise,  $S$  é a função utilizada para medir a similaridade entre duas biometrias e  $X_I$  é o modelo armazenado no banco de dados para o usuário  $I$ .

$$V(I, X_q) = \begin{cases} true & \text{if } S(X_q, X_I) \geq t \\ false & \text{if } S(X_q, X_I) < t \end{cases} \quad (2.8)$$

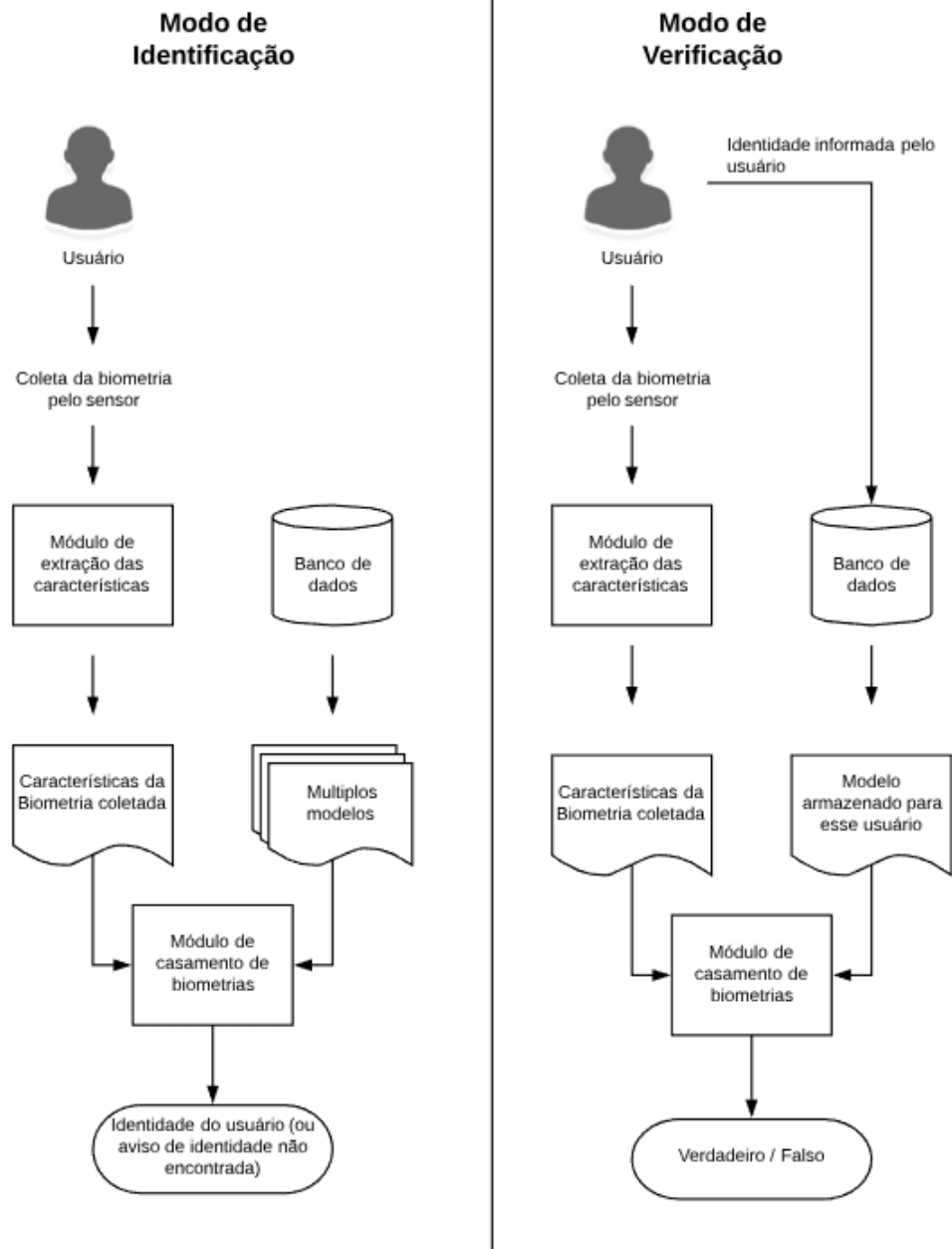


Figura 2.7: Comparação entre os modos de identificação e verificação em um sistema biométrico.

Na Equação 2.8, o valor  $t$  corresponde a uma constante chamada de limiar, ou *threshold*, que marca para qual valor de  $S$  a identidade do usuário passa a ser dada como correta. Nessa equação, estamos assumindo que a função de similaridade retorna um valor numérico diretamente proporcional ao nível de similaridade entre as biometrias analisadas, ou seja, biometrias similares deverão resultar em valores de  $S$  maiores que biometrias diferentes.

Analogamente, a identificação de um usuário também pode ser descrita em termos

matemáticos e está definida na Equação 2.9. Nessa equação, como na Equação 2.8,  $X_q$  faz referência à biometria coletada para análise,  $S$  é a função utilizada para medir a similaridade entre duas biometrias e  $X_k$  é o modelo armazenado no banco de dados para o usuário  $k$ . Nesse caso, temos o valor  $k$  variando de 1 até  $N$ , sendo  $N$  a quantidade de usuários cadastrados no banco. Como anteriormente,  $t$  corresponde ao valor de *threshold* e  $I_k$  corresponde à identidade definida para o  $k$ -ésimo usuário cadastrado no banco de dados.

$$I(X_q) = \begin{cases} I_k & \text{if } \max \{S(X_q, X_k)\} \geq t, \quad k = 1, 2, \dots, N \\ \emptyset & \text{if } \max \{S(X_q, X_k)\} < t, \quad k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2.9)$$

As fórmulas que deram origem a Equação 2.8 e a Equação 2.9 aqui apresentadas estão definidas em [9].

### 2.1.5 Métodos de Avaliação de Sistemas Biométricos

Uma mesma característica biométrica pode servir de base para a criação de inúmeros sistemas biométricos, com modelos, algoritmos e sensores distintos. O sistema que utiliza o reconhecimento de digitais para liberar o acesso a um *smartphone*, por exemplo, é completamente diferente do sistema que os bancos utilizam em seus caixas eletrônicos. Como definir, então, qual a melhor escolha de sistema biométrico para uso em uma determinada aplicação? Para responder essa pergunta, primeiro precisamos compreender em que ponto um sistema biométrico falha. Consideraremos para esse estudo somente os sistemas biométricos em modo de verificação já que os sistemas de identificação podem, até certo nível, serem analisados como um sistema de verificação aplicado sequencialmente à todos os usuários cadastrados no banco.

Um sistema biométrico de verificação, quando acionado, pode apresentar somente duas respostas ao usuário:

- $R_1$ : A biometria coletada  $X_q$  **não** corresponde ao modelo armazenado para a identidade informada e, portanto, o usuário **não** é quem diz ser.
- $R_2$ : A biometria coletada  $X_q$  corresponde ao modelo armazenado para a identidade informada e, portanto, o usuário é quem diz ser.

Não importa quão robusto o sistema biométrico seja, duas medidas diferentes de uma mesma biometria sempre apresentarão diferenças, mesmo que pequenas. Essas diferenças podem surgir de ruídos adicionados pelo sensor, das condições ambientais (como temperatura e umidade) ou, simplesmente, pela diferença de posicionamento do usuário na

hora da coleta. A existência dessas diferenças entre duas medidas pode fazer com que o módulo de casamento de biometrias gere uma resposta errada.

Um sistema biométrico pode dar dois tipos de respostas erradas:

- **Erro tipo 1:** ao ser apresentado à amostras de um mesmo usuário, o sistema decide por  $R_1$ . Esse erro é chamado de falso negativo (FN).
- **Erro tipo 2:** ao ser apresentado à amostras de usuários diferentes, o sistema decide por  $R_2$ . Esse erro é chamado de falso positivo (FP).

A chance de ocorrerem falsos negativos e falsos positivos em uma validação biométrica varia com o valor de limiar definido pelo sistema. Um limiar baixo torna a validação mais abrangente, aumentando o número de falsos positivos. Analogamente, um limiar alto define que só biometrias muito similares serão consideradas como sendo de um mesmo usuário, aumentando a quantidade de falsos negativos.

A variação das taxas de falso positivo e falso negativo em relação ao limiar está representadas pela Figura 2.8. Note que, conforme o limiar chega perto do limiar mínimo as taxas de falso negativo tendem à zero. O inverso acontece quando o limiar tende ao seu valor máximo. Perceba também que as taxas de FP e FN são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a taxa de FP, menor será a taxa de FN e vice-versa. O limiar para o qual as taxas de falso positivo e falso negativo se igualam é chamado de *Equal Error Rate*, ou taxa de erro igual, representada no gráfico pela sigla EER.

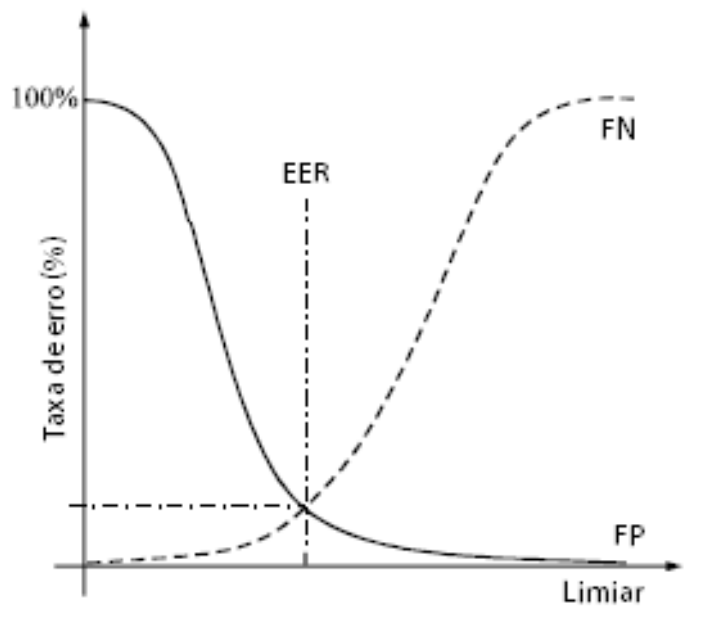


Figura 2.8: Variação das taxas de FP e FN em relação ao limiar.

Para se definir o EER para um sistema, um gráfico como o da Figura 2.8 deve ser construído, utilizando-se um arquivo de modelos de tamanho considerável, realizando-se o casamento entre eles e calculando FPs e FNs para os diferentes possíveis valores de limiar. Vale lembrar que, por variar conforme a quantidade e qualidade das amostras utilizadas, o EER deve ser definido como uma faixa de valores e não um valor absoluto, considerando sua possível variação.

Idealmente, um sistema biométrico perfeito trabalharia com um limiar capaz de zerar ambas as taxas de erro. Em sistemas reais, no entanto, isso é impossível e, para muitas aplicações, o EER é utilizado para cálculo do limiar já que proporciona um equilíbrio entre FP e FN. Ainda assim, sistemas que prezam pela segurança podem escolher limiares acima do EER, minimizando a ocorrência de falsos positivos, enquanto sistemas que prezam pela agilidade podem decidir por "barrar" menos usuários, escolhendo um limiar menor que o definido pelo EER.

É de se esperar que um sistema com um menor EER produza menos FPs e FNs e, portanto, apresente um resultado melhor quando em comparação à outro, sendo considerado "melhor". Ainda assim, os parâmetros que definem a qualidade de um sistema biométrico costumam variar muito conforme a aplicação e esbarram diretamente nas cinco características de uma boa característica biométrica discutidas na Sessão 2.1.4 desse trabalho.

Sistemas com baixa taxa de falsos negativos são considerados mais robustos já que apresentam pouca variação nas biometrias coletadas de um mesmo indivíduo. A taxa de falsos positivos, por outro lado, reflete diretamente a distintividade de um sistema, avaliando o quão variantes são as biometrias em uma população. A disponibilidade é dada pela "taxa de falha de coleta", ou seja, pela quantidade de pessoas que não conseguiram se cadastrar por impossibilidade física, enquanto a acessibilidade pode ser medida pela quantidade de biometrias que o sistema é capaz de analisar por unidade de tempo. Por último, a aceitabilidade do sistema somente pode ser medida por meio de coleta direta de opiniões entre os usuários.

### **2.1.6 Classificação e validação de impressões digitais**

Ainda que você não seja um especialista em biometria e nunca tenha utilizado um sensor de retina ou de voz, provavelmente já teve suas digitais coletadas. Mesmo com todas as pesquisas focadas em encontrar e testar novas características biométricas, a identificação de pessoas pelas suas impressões digitais continua sendo uma das opções mais utilizadas e estudadas da biometria graças a sua alta robustez, distintividade, facilidade de coleta e baixo custo de implementação [10].

Atualmente, as aplicações das impressões digitais em biometria são inúmeras e podemos destacar, dentre elas:





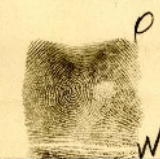



- **Análise Forense:** A análise forense utiliza impressões digitais coletadas em trabalho de campo para ligar possíveis suspeitos às cenas de crime e, também, na identificação da identidade de pessoas mortas ou inconscientes.
- **Comercial:** Entre outras aplicações, as impressões digitais são utilizadas para desbloqueio de *smartphones*, reconhecimento de identidade no uso de caixas eletrônicos e liberação de acesso em computadores, portas e cancelas.
- **Governamental:** Atualmente, o governo brasileiro, como em outros países, mantém um registro de digitais de todos os seus cidadãos, coletadas no momento da emissão da carteira de identidade e consultadas em caso de suspeita de crimes. Além disso, o Tribunal Superior Eleitoral e a Polícia Federal mantém os seus próprios bancos de digitais, recolhidos, respectivamente, no momento da emissão do título de eleitor e do passaporte.

Segundo [11], a aplicabilidade de impressões digitais como características biométricas se deve a três fatores simples. Primeiramente, a composição de vales e cumes (as ranhuras que formam o desenho da digital, como representado na Figura 2.9) que compõem uma impressão digital é única e varia não só entre indivíduos, mas entre os dedos de um mesmo indivíduo. Apesar disso, existe um número finito de variações possíveis e, por isso, elas podem ser facilmente identificadas e catalogadas, o que permite a criação de sistemas automatizados para sua identificação. Por último, temos que as impressões digitais são características robustas e, sendo assim, não sofrem grandes alterações com o passar do tempo.



Figura 2.9: Representação dos cumes e vales em uma impressão digital ampliada.

A possibilidade de se utilizar impressões digitais no reconhecimento de pessoas não é um assunto recente e os primeiros registros de digitais sendo aplicadas na identificação pessoal datam de até 6.000 anos A.C [12]. Na ciência moderna, o uso de digitais para o reconhecimento de pessoas começou com Henry Faulds, em 1870, um cirurgião britânico, responsável pela primeira identificação de uma digital, deixada em uma garrafa de álcool [13]. Seus estudos serviram de base para que Francis Galton se aprofundasse no assunto e publicasse, em 1892, o primeiro livro sobre impressões digitais, intitulado *Fingerprints* [14]. Inspirado pelas observações de Galton, Edward Henry, um policial britânico, estabeleceu em 1897 um sistema de identificação de digitais adotado pela *Scotland Yard* em 1901 [15]. Paralelamente, o argentino Juan Vucetich criou um sistema similar ao de Henry, também baseado nas observações de Galton, e adotado pelas polícias em toda a América Latina [12].

Name <u>Henry Methwin</u>		Classification <u>15/23WO W</u>	
Alias _____		Ref. <u>23WOI 17</u>	
No. <u>32834</u>	Color <u>Whit</u>	Sex <u>Male</u>	
1.—Right thumb	2.—Index finger	3.—R. Middle finger	4.—R. Ring finger
			
5.—R. Little finger	6.—Left thumb	7.—L. Index finger	8.—L. Middle finger
			
9.—L. Ring finger	10.—L. Little finger	Amputations _____	
		Left thumb Right thumb	
Four fingers taken simultaneously Left Hand		Four fingers taken simultaneously Right Hand	
			
Classified by _____		Prisoner's Signature <u>Henry Methwin</u>	
Verified by _____			
Searched by _____			

PLEASE DO NOT FOLD THIS CARD

Figura 2.10: Cartão de identificação de um prisioneiro utilizado na classificação pelo sistema de Henry na Penitenciária Estadual de Oklahoma, Estados Unidos, em 1935.

Em seu trabalho, Henry descreve um sistema de catalogação de impressões digitais

em que todas as dez digitais de uma pessoa são coletadas em um cartão e, a partir da análise do formato dessas digitais, arquiva-se esse cartão em um determinado grupo. Dessa forma, caso a polícia precise checar um suspeito, basta colher as suas digitais em um novo cartão, calcular o seu grupo correspondente e, então, checa-la manualmente com os membros previamente cadastrados nesse grupo.

Apesar de interessante, o sistema de Henry esbarra em problemas difíceis de resolver já que impressões digitais de um mesmo dedo podem sofrer distorções dependendo do posicionamento do dedo na hora da coleta, o que levaria à uma classificação errada de grupos, invalidando a busca.

Os sistemas de classificação de digitais iniciais, como é o caso do sistema de Henry, costumavam se basear no formato geral da digital, mais fácil de observar e distinguir. A imagem Figura 2.11 apresenta algumas das possíveis classes utilizadas na classificação de digitais, como descrito em [16].

Para sistemas que reconhecem a identidade de pessoas através do reconhecimento de impressões digitais de forma automatizada, no entanto, considerar somente o formato geral da digital não basta já que muitas pessoas possuem o mesmo formato de digital. O próprio sistema de Henry, com identificação manual, só é capaz de acertar em, aproximadamente, 75% das tentativas. [6]

Para resolver esse problema, olhar a digital como um todo não basta, é preciso examinar a formação de cada cume e vale individualmente. Ao considerarmos uma digital, é possível dividir os detalhes à serem analisados em três níveis distintos de profundidade. [17]

- **Primeiro nível:** é o utilizado por Henry em seu sistema de classificação de digitais. Nesse nível, consideramos o direcionamento dos cumes e vales no dedo para diferenciar as impressões digitais. Nesse nível também incluímos os núcleos e os deltas, estruturas bem características que se formam na junção de dois cumes ou na mudança brusca de direção dos cumes, como representado na Figura 2.12. Analisando as características identificadas nesse nível é possível, também, distinguir uma digital entre os tipos apresentados na Figura 2.11.
- **Segundo nível:** nesse nível, ao invés de considerarmos a estrutura da digital como um todo, a análise é feita mais detalhadamente, e as características locais dos cumes e vales são analisados. Segundo [11], pela análise da digital nesse nível é possível identificar mais de 150 detalhes diferentes. Nem todos esses detalhes são, no entanto, utilizados na identificação e classificação de impressões digitais já que boa parte deles depende fortemente do estado e da qualidade da digital capturada. Existe, porém, um conjunto de características observáveis mais robustas e estáveis e que podem,





(a) Arch



(b) Tented Arch



(c) Right loop



(d) Left Loop



(e) Twin loop



(f) Whorl

Figura 2.11: Exemplos de classes utilizadas na classificação de digitais. Todas as imagens foram retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho.



Figura 2.12: Identificação dos núcleos e deltas em uma digital.

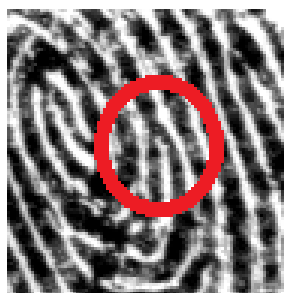
portanto, ser utilizadas na identificação de digitais. Chamamos esse conjunto de detalhes de Galton, em homenagem ao trabalho de Francis Galton, ou, como são mais comumente chamados, minúcias. As minúcias mais comumente utilizadas na identificação de digitais estão representadas na imagem Figura 2.13. Vale a pena notar que, no passado, a identificação manual dos cartões catalogados pelo sistema de Henry era feita através da observação de minúcias, utilizando-se uma lupa e individualmente para cada digital, um processo demorado e que necessitava de mão de obra treinada.

- **Terceiro nível:** esse é o nível que considera os menores detalhes e só é visualizável em impressões digitais capturadas com alto nível de resolução e qualidade. Nesse nível, observam-se, entre outros detalhes, a largura dos cumes, as formas das suas terminações, pequenas cicatrizes e os próprios poros da pele que possuem localização e formatos muito distintos. Apesar de funcionarem bem como características biométricas, os detalhes observados nesse nível não são amplamente utilizados, por demandarem um alto gasto e esforço computacional na implementação de bons mecanismos de coleta que garantam a qualidade das imagens obtidas. Ainda assim, esforços de pesquisa estão sendo feitos para tornar esse nível de detalhes aplicável comercialmente na identificação de digitais com e sem contato, como podemos constatar em [18] e [19].

As minúcias possuem um papel fundamental na identificação de digitais e ainda é através do reconhecimento delas que uma boa parte dos sistemas de identificação de digitais funciona. Segundo [20], uma única digital pode conter mais de 100 minúcias,



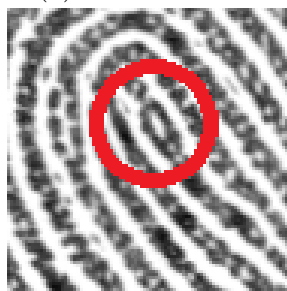
(a) Fim de Cume



(b) Bifurcação



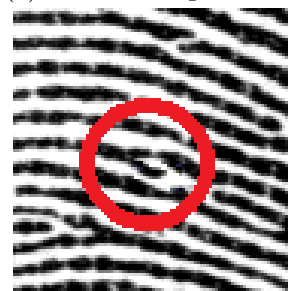
(c) Cume Independente



(d) Lago



(e) Ilha



(f) Espora



(g) Cruzamento

Figura 2.13: Exemplos das minúcias mais comuns encontradas em impressões digitais. Todas as imagens foram retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho.

mas a correspondência de um pequeno número delas, entre 12 e 15, já é suficiente para a comprovação da identidade.

Atualmente, é raro trabalharmos com sistemas de identificação de identidade através de impressões digitais que utilizem exclusivamente características de primeiro nível.

Normalmente, os sistemas de identificação de digitais utilizam características de segundo nível, como no caso dos sistemas baseados em detecção de minúcias, ou uma combinação de características de primeiro e segundo níveis, um exemplo sendo os sistemas que utilizam a orientação dos vales e cumes para definir se duas digitais pertencem ao mesmo dedo.

### 2.1.7 Impressões Digitais com e sem Contato

Hoje, para quase todas as aplicações, a coleta de digitais não é mais feita através de cartões, como no sistema de Henry. Para coletar e armazenar impressões digitais com melhor qualidade, velocidade e segurança, utilizamos sensores eletrônicos, que captam o padrão de cumes e vales do dedo e geram uma imagem digital que, por sua vez, é armazenada diretamente em um banco de dados.

Esses sistemas podem ser de diversos tipos, formatos, tamanhos, preços e utilizar tecnologias como ultrassom, capacitores, sensores térmicos ou sensores óticos. Ainda assim, por mais avançada que a tecnologia de coleta utilizada seja, esses sistemas não estão imunes à erros na hora da coleta, como vimos na Sessão 2.1.5 desse trabalho.

Na área de coleta de impressões digitais para uso em identificação biométrica, os sistemas mais utilizados ainda são aqueles em que o usuário precisa pousar ou rolar o dedo sobre uma superfície de captura, que registra e coleta a digital. Esse tipo de captura de digitais é feito utilizando-se um equipamento similar ao apresentado na Figura 2.14. Chamamos esse tipo de sensor de sensor com contato.



Figura 2.14: Exemplos de sensores utilizados na captura de digitais sem contato.

Apesar de baratos e amplamente utilizados no mercado, os sensores com toque possuem alguns problemas que dificulta a aquisição e reconhecimento das imagens obtidas por ele. Dentre outros, podemos destacar:

- **Diferença de pressão no dedo:** Por se tratar de um sensor com toque, é esperado que o usuário posicione o dedo e aplique algum tipo de pressão à superfície de coleta, seja na captura estática (o dedo é colocado sobre o sensor) ou na captura rolada (o dedo é posicionado de lado e então rolado sobre o sensor). Essa pressão é necessária para que os vales e cumes da digital sejam capturados corretamente. É muito difícil, porém, que um mesmo usuário consiga manter uma pressão similar em duas capturas diferentes do mesmo dedo. Essa diferença de pressão faz com que as franjas da digital se deformem de forma distinta, resultando em diferenças entre a captura nova e o modelo armazenado no banco. A Figura 2.15 apresenta duas imagens do mesmo dedo, coletadas pelo mesmo sensor de digitais com toque e em sequência. Apesar de terem sido coletadas no mesmo dia e em condições similares, a pressão diferente do dedo na superfície de coleta faz com que as digitais pareçam diferentes à olho nu.



Figura 2.15: Exemplos de digitais de um mesmo dedo capturadas sob pressão diferente em um sensor de digitais com toque.

- **Posicionamento do dedo:** É improvável que o usuário se posicione exatamente da mesma forma durante duas capturas diferentes de um mesmo dedo, o que pode levar a leituras deslocadas, tortas, ou distorcidas. A movimentação do dedo durante a leitura também pode gerar uma captura errada da digital, que provavelmente sairá distorcida ou desfocada.
- **Agentes externos:** Como toda superfície manuseada por diferentes pessoas, os sensores de digitais com toque tendem a acumular sujeiras, oleosidade e suor que, a cada nova captura, vão se juntando e acabam por prejudicar as capturas posteriores,

adicionando ruído à imagem. Para evitar esse problema, os sensores precisam ser constantemente limpos e verificados, o que demanda tempo e esforço.

- **Deformidades na digital:** Umidade ou a falta dela no ambiente, desgastes na digital, doenças de pele, cortes nos dedos ou, até mesmo, sujeiras ou manchas podem modificar a digital e prejudicar o seu reconhecimento. A figura Figura 2.16 apresenta dois exemplos de como o desgaste e pequenos cortes podem influenciar na captura de impressões digitais por sensores com contato.



Figura 2.16: Exemplos de digitais com falhas capturadas utilizando-se sensores de digitais com contato.

- **Segurança:** Os dedos, assim como todas as outras partes da pele humana, produzem uma espécie de óleo, que se acumula sobre a pele. Ao se pressionar esse dedo sobre uma superfície lisa, como a do sensor de digitais com toque, uma parte desse óleo se deposita, deixando uma marca idêntica a impressão digital do dedo em questão. Chamamos essa impressão não-intencional de "impressão digital latente". Uma pessoa mal intenciona, com conhecimentos de biometria e química, pode facilmente capturar essa impressão latente e replica-la em um modelo tridimensional, utilizado para fraudes.

Na maioria dos casos, essas deformações são compensadas pelo próprio sistema de captura, que aplica algoritmos de melhoramento na digital obtida. Esses algoritmos, no entanto, só são capazes de melhorar a digital até certo ponto e esbarram nos problemas de coleta apresentados acima, ligados ao sensor utilizado. Além disso, nenhum algoritmo é capaz de resolver o problema de segurança apresentado pela aquisição de digitais com toque.

[21]

Tentando resolver esses problemas e aumentar ainda mais a confiabilidade dos sistemas de reconhecimento de impressões digitais, as empresas tem investido no desenvolvimento de sensores de digitais sem contato, como os apresentados na figura Figura 2.17.



Figura 2.17: Exemplos de sensores utilizados na captura de digitais sem contato.

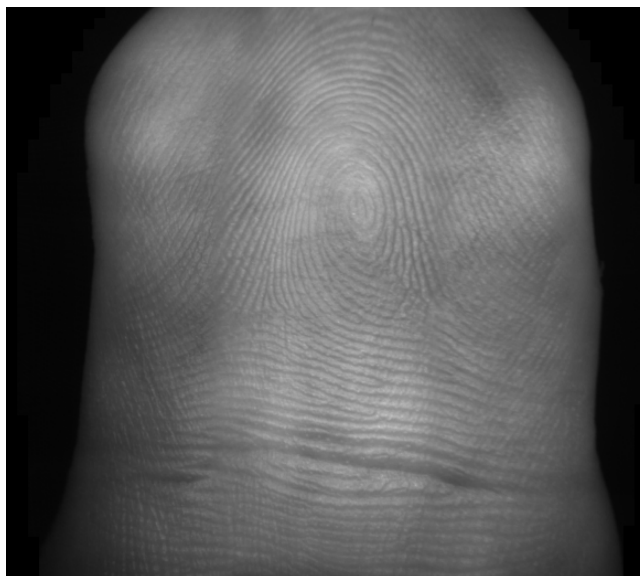
Por não ser necessário o toque do usuário no sensor, boa parte dos problemas apresentados anteriormente e inerentes a aquisição de digitais com contato são resolvidos nos sensores sem contato.

Ao dispensar o uso de força, já que não há uma superfície para se pressionar o dedo, o sensor de digitais sem contato evita a captura de distorções na imagem causadas pela pressão ou movimentação do dedo durante a coleta. Além disso, pela sua própria natureza, os sistemas de captura sem contato evitam a formação de digitais latentes, já que não há uma superfície para a sua impressão. Por último, as impressões digitais capturadas por sensores de digital sem contato costumam ser menos influenciadas pela presença de sujeira, gordura, doenças de pele, falta ou excesso de umidade.

Outra vantagem dos sensores sem contato em relação aos sensores de captura tradicional é o tamanho da área de captura. Em um sensor com contato, somente parte da digital é coletada, já que o formato do dedo impede que toda a área da pele seja pressionada sobre o sensor. Em sensores sem contato, no entanto, isso não é um problema já que a digital pode ser capturada de vários ângulos ao mesmo tempo [22]. Para exemplificar essa diferença, a imagem Figura 2.18 apresenta duas digitais capturadas para um mesmo dedo, uma utilizando-se um sensor com contato tradicional e a outra utilizando o sensor de digitais sem contato empregado na produção desse trabalho.



(a) Digital capturada com contato



(b) Digital capturada sem contato

Figura 2.18: Exemplos de uma mesma digital capturada com tecnologia sem e com contato. Perceba como a digital (a) apresenta uma área útil menor em comparação à digital (b). Imagens retiradas do banco de dados produzido e utilizado nesse trabalho.

A coleta de digitais utilizando-se sensores sem toque não consegue, no entanto, resolver todos os problemas referentes ao reconhecimento automático de impressões digitais e acaba, até mesmo, gerando problemas novos.

Um dos maiores problemas enfrentados pelos sistemas que utilizam esse tipo de sensor é, exatamente, o posicionamento do dedo do usuário no momento da coleta. A falta de uma base de contato faz com que o dedo esteja disponível para movimento em todas as três direções e não somente em duas, como descrito em [23]. Além disso, a iluminação e o posicionamento do dedo durante a coleta também são fatores importantes e influenciam diretamente na qualidade da imagem capturada por esse tipo de sistema. Por fim, podemos destacar a falta de familiaridade das pessoas com a tecnologia de captura de digitais sem toque, o que tornam a captura mais difícil e demorada, demandando a presença de um técnico familiarizado com o equipamento e capaz de guiar os usuários durante todo o processo.

## 2.2 Trabalhos Correlatos

Atualmente, existem inúmeros trabalhos sendo produzidos e publicados no campo da biometria por impressões digitais, alguns dos quais possuem correlação direta com o produzido aqui. Abaixo, citamos alguns exemplos.



O trabalho de [24], produziu um método de compatibilidade entre impressões digitais com contato e impressões digitais adquiridas sem contato. Nesse trabalho, o autor trabalha diretamente com a vista plana produzida pelo *driver* do sensor sem contato, apresentando, portanto, uma solução diferente da proposta aqui. Similar ao que fizemos, nesse trabalho, as imagens resultantes sem contato também são comparadas às imagens equivalentes adquiridas por sensores com contato.

Em [25], o autor propõe um método de aquisição de impressões digitais sem contato, baseado na captura de imagens simultâneas de duas câmeras. Nessa abordagem, o dedo precisa estar em movimento, permitindo às câmeras capturar imagens suficientes para a produção de um modelo 3-D no formato do dedo. Apesar de não ser aplicável ao sensor de captura de digitais sem contato que utilizamos, esse sistema apresentou ótimos resultados quando comparado aos sensores de digitais com contato.

No artigo [26], o autor propõe um método de junção das três vistas, similar a panorâmica criada pelo *driver* do sensor sem contato que utilizamos para testes. Nesse trabalho, o autor comprova a eficácia do seu sistema em comparação os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de casamento para um banco de digitais capturadas com contato.

# Capítulo 3

## Solução Proposta

Nesse capítulo, analisaremos os passos necessários para a avaliação de cada um dos seis grupos descritos na Sessão 1.3. Para facilitar o acompanhamento do leitor, os grupos previamente definidos são:

- **Grupo 1:** Composto pelas digitais capturadas pelo sensor de digitais com contato.
- **Grupo 2:** Composto pelas digitais planificadas geradas automaticamente pelo *driver* utilizado na aquisição de impressões digitais sem contato.
- **Grupo 3:** Composto pelas vistas centrais das digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato.
- **Grupo 4:** Composto pelas vistas centrais das digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos o recorte das digitais, privilegiando a área de interesse.
- **Grupo 5:** Composto pelas três vistas capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos a combinação matemática das três vistas.
- **Grupo 6:** Composto pelas três vistas capturadas pelo sensor de digitais sem contato. Nesse grupo, aplicaremos a combinação matemática das três vistas e, também, o recorte das digitais, privilegiando a área de interesse.

### 3.1 Processamento das digitais coletadas

Nessa sessão, explicamos as técnicas envolvidas no processamento de imagens em cada um dos grupos descritos na sessão anterior. Para facilitar a leitura e o entendimento do leitor, dividiremos o conteúdo dessa sessão em tópicos por grupo, excluindo-se o Grupo 1, para o qual não há tratamento das imagens coletadas.

### 3.1.1 Grupo 2

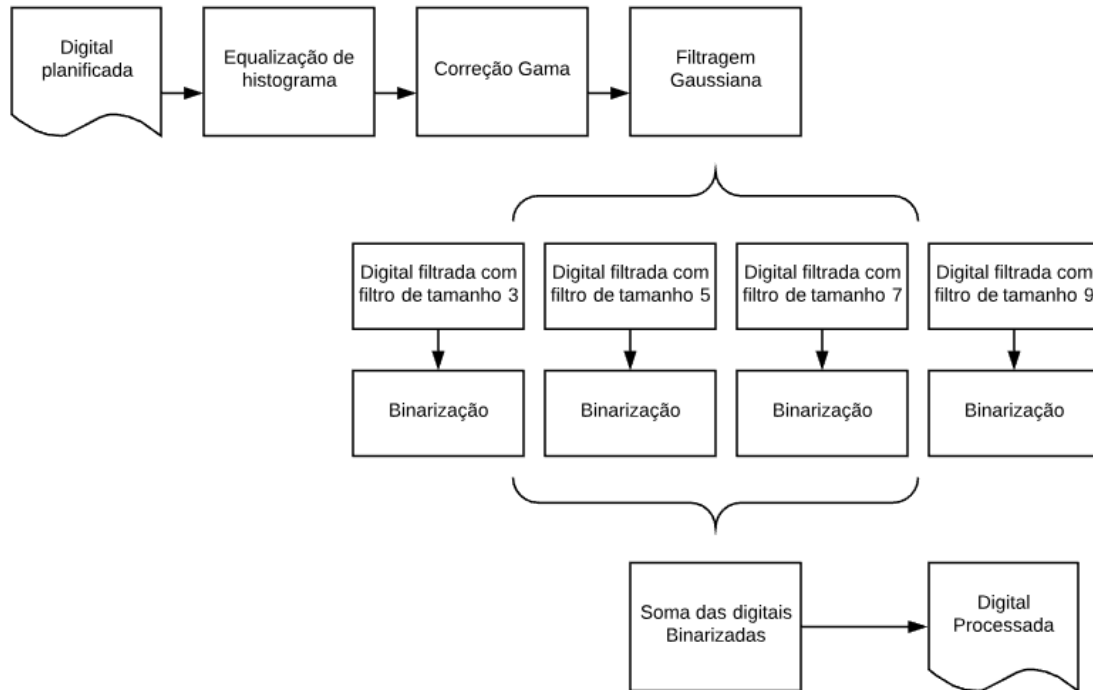


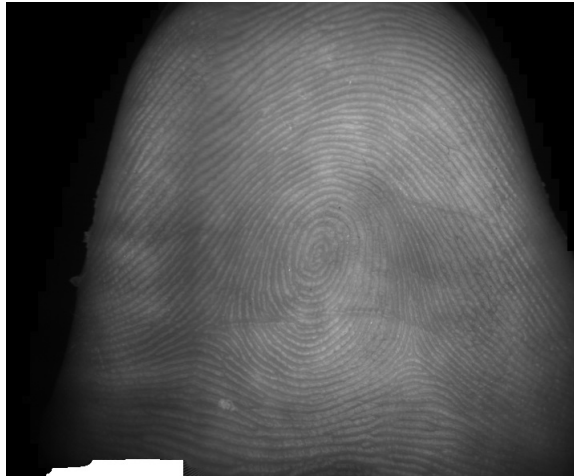
Figura 3.1: Fluxograma de passos à serem seguidos no processamento das digitais do Grupo 2.

Nesse grupo, como descrito anteriormente, estão as digitais planificadas geradas pelo *driver* do sensor de digitais sem contato.

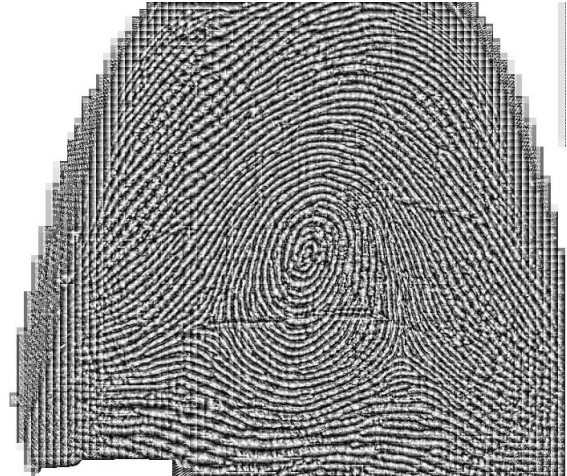
Para a correta aplicação do algoritmo de detecção de minúcias, é necessário que essas digitais sejam processadas e transformadas em digitais mais parecidas com as coletadas pelos sensores de digitais com contato. Para conseguir esse efeito, utilizaremos parcialmente a solução apresentada em [24], que produz bons resultados e resolve satisfatoriamente o problema.

Após a coleta e montagem da digital planificada pelo sistema, a imagem resultante é submetida a uma equalização local de histograma, que tem por objetivo corrigir possíveis diferenças na intensidade da iluminação incidente no dedo. Nessa equalização, utilizamos uma máscara local de  $9 \times 9$  *pixels*, que produz o efeito demonstrado na Figura 3.2.

Em seguida, a impressão equalizada é submetida, também, a uma correção gama, que torna mais nítida a diferença entre os vales e os cumes. Essa aplicação da função gama ajudará na obtenção de bons resultados durante a etapa de binarização das imagens. Para



(a) Impressão planifica original



(b) Impressão planificada com histograma local

Figura 3.2: Exemplo de aplicação do histograma local em uma imagem do Grupo 2.

essa correção gama, o filtro segue a Equação 2.4, com  $c = 1$  e  $\gamma = 1.5$ . O resultado da aplicação dessa correção gama na Figura 3.2b pode ser conferido na Figura 3.3.

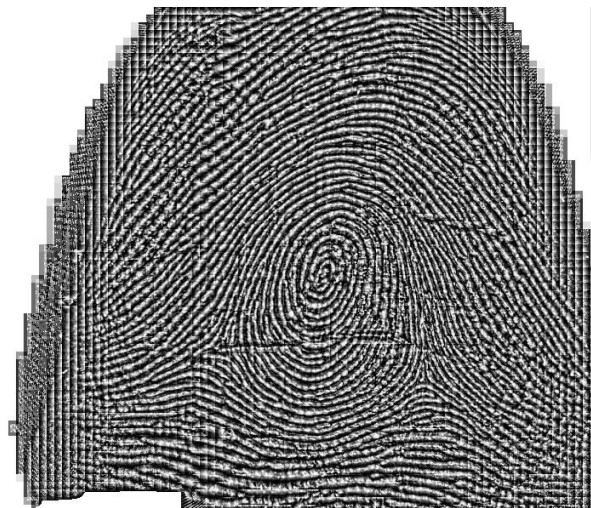


Figura 3.3: Aplicação da correção gama à Figura 3.2b.

Após a aplicação da função gama, a imagem passa ainda por quatro filtragens gaussianas, com tamanhos de filtros distintos, dando origem a quatro novas imagens. Um exemplo dessa aplicação e das quatro imagens produzidas a partir da Figura 3.3 é apresentado na Figura 3.4.

Em um próximo passo, cada imagem obtida através da aplicação da filtragem gaussiana é binarizada. Para isso, utilizamos um *software* chamado *mindtct*. Apesar do *mindtct* ser, na verdade, um *software* detector de minúcias, ele possui um programa de binarização interno, altamente adaptado ao uso em impressões digitais. Esse *software* é parte do

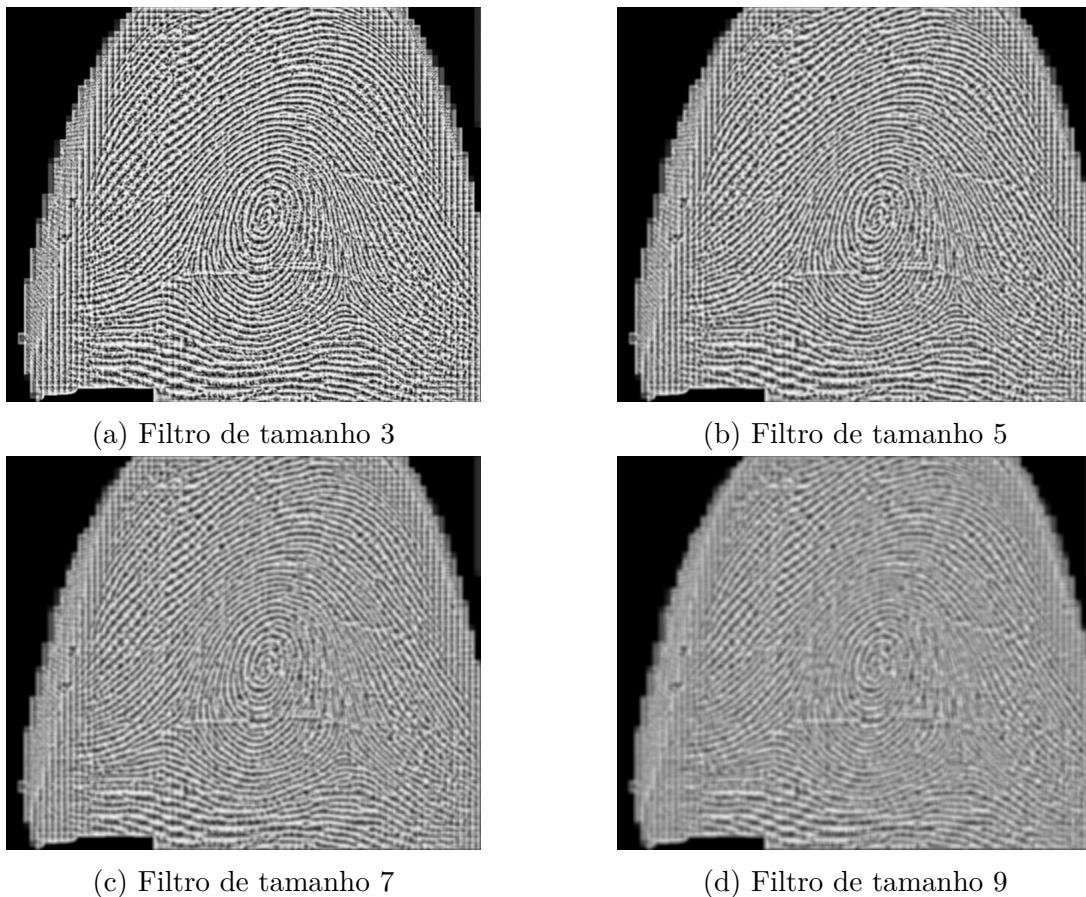


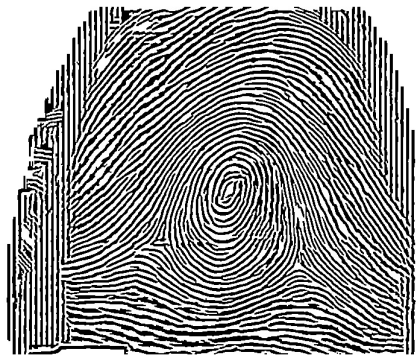
Figura 3.4: Exemplo das quatro imagens pós filtragem gaussiana obtidas a partir da Figura 3.3.

pacote de *softwares* oferecido pelo *National Institute of Standards and Technology* para tratamento e reconhecimento de impressões digitais. Mais informações sobre o *mindtct* e sobre esse pacote, podem ser encontradas em [27]. As imagens obtidas pela binarização das quatro imagens contidas na Figura 3.4 estão representadas na Figura 3.5.

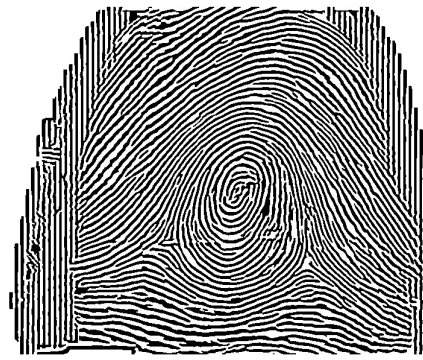
Por fim, todas as quatro digitais binarizadas são somadas e, então, calculamos a sua média, seguindo-se a Equação 3.1.

$$I_b = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 I_i \quad (3.1)$$

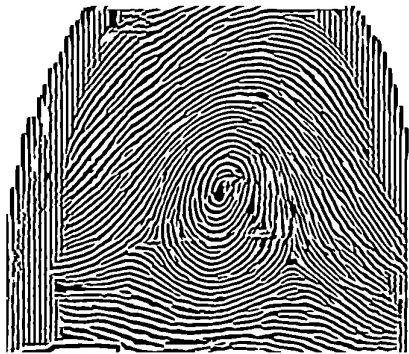
Essa imagem  $I_b$  obtida pela aplicação da Equação 3.1 também é uma imagem binária, conforme podemos constatar pela Figura 3.6b. A criação das quatro imagens binárias intermediárias é necessária na obtenção da imagem binária final, evitando que possíveis ruídos sejam propagados para a imagem processada e acabem por ser confundidos com minúcias.



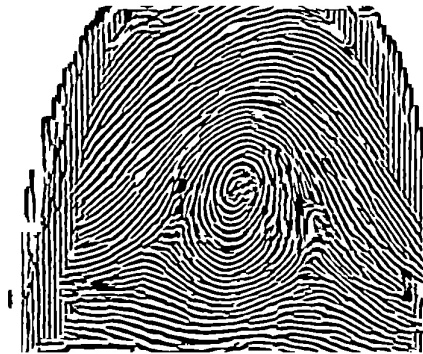
(a) Binarização da imagem Figura 3.4a



(b) Binarização da imagem Figura 3.4b



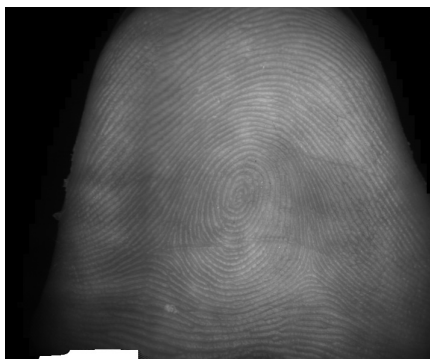
(c) Binarização da imagem Figura 3.4c



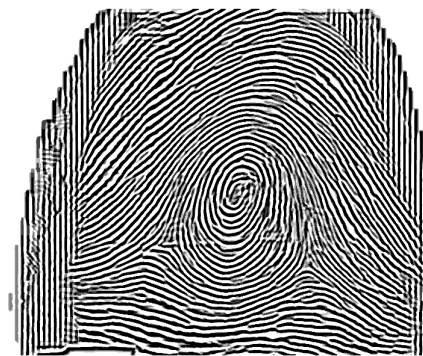
(d) Binarização da imagem Figura 3.4d

Figura 3.5: Exemplo das quatro imagens pós binarização obtidas a partir da Figura 3.4.

É importante citar que as outras etapas de processamento descritas em [24] não foram seguidas aqui já que, diferentemente do trabalho original, o nosso objetivo não é obter uma impressão digital esteticamente agradável ao olhar, mas sim uma que seja facilmente identificável para o sistema automatizado de reconhecimento. Uma comparação da impressão digital original e da digital processada final é dada pela Figura 3.6



(a) Imagem planificada original



(b) Imagem binária obtida pela média das quatro imagens da Figura 3.5

Figura 3.6: Comparação entre a imagem original e a imagem final obtida após o processamento apresentado na Figura 3.1.

### 3.1.2 Grupo 3

No Grupo 3, consideramos somente as vistas centrais obtidas pela captura de digitais sem contato utilizando-se o sensor da TBS.

Por se tratar de digitais sem contato, as imagens desse grupo também não podem ser utilizadas diretamente como entrada para o *software* detector de minúcias e, por isso, precisam ser processadas previamente para se assimilarem às impressões digitais com toque capturadas pelo sensor com contato. No processamento dessas digitais, utilizamos os mesmos passos seguidos no processamento das digitais do Grupo 2. Um exemplo de imagem captura originalmente para o Grupo 3 e da sua imagem processada correspondente de saída pode ser visto na Figura 3.7b.



Figura 3.7: Exemplo de imagem captura originalmente para o Grupo 3 e da sua imagem processada correspondente de saída.

### 3.1.3 Grupo 4

No Grupo 4, assim como nos Grupos 2 e 3, o processamento das digitais segue a mesma ordem de etapas descritas na Sessão 3.1.1 desse trabalho, porém, ao final do processamento, adicionamos uma etapa extra, referente ao recorte da área de interesse da digital.

Para fazer o recorte das digitais, partimos do princípio de que a maior parte da informação útil da digital está no seu centro e que, portanto, as bordas contêm uma grande quantidade de ruídos que podem levar a uma validação errada da digital.

Para o processo de recorte, escolhemos a menor dimensão entre largura e altura da imagem (já previamente processada pelo processo descrito para o Grupo 2) como o diâmetro da nossa área de interesse. Como as vistas centrais capturadas pelo sensor sem contato tendem a ser muito verticalizadas, ou seja, contém uma parcela maior do dedo, antes de fazer o recorte definitivo, fazemos um pré-recorte da imagem processada, em que desconsideramos os seus 20% inferiores.

Com essa nova imagem e o diâmetro definido, desenhamos um círculo com centro no centro geométrico da imagem e com raio igual a metade do diâmetro estabelecido. Por fim, descartamos qualquer parte da digital que não esteja contida nesse círculo.

A imagem Figura 3.8 contém uma digital processada para o Grupo 3 e o seu equivalente recortado para o Grupo 4.



(a) Digital utilizada no Grupo 3



(b) Digital utilizada no Grupo 4, correspondente à Figura 3.10a

Figura 3.8: Exemplo de imagem processada para o Grupo 3 e o seu equivalente pós-recorte para o Grupo 4.



### 3.1.4 Grupo 5

No processamento das digitais do Grupo 5, devemos considerar as três vistas, que são processadas individualmente. Para esse grupo, cada conjunto de três vistas é visto como uma única digital.

Assim como nas outras digitais capturadas pelo sensor sem contato, nesse caso aplicaremos as etapas de processamento de imagens descritas na Sessão 3.1.1 à cada uma das três vistas individualmente, gerando um conjunto com três vistas processadas. Um exemplo de três vistas capturadas para uma única digital e o seu equivalente pós-processamento para o Grupo 5 pode ser visto na Figura 3.9.

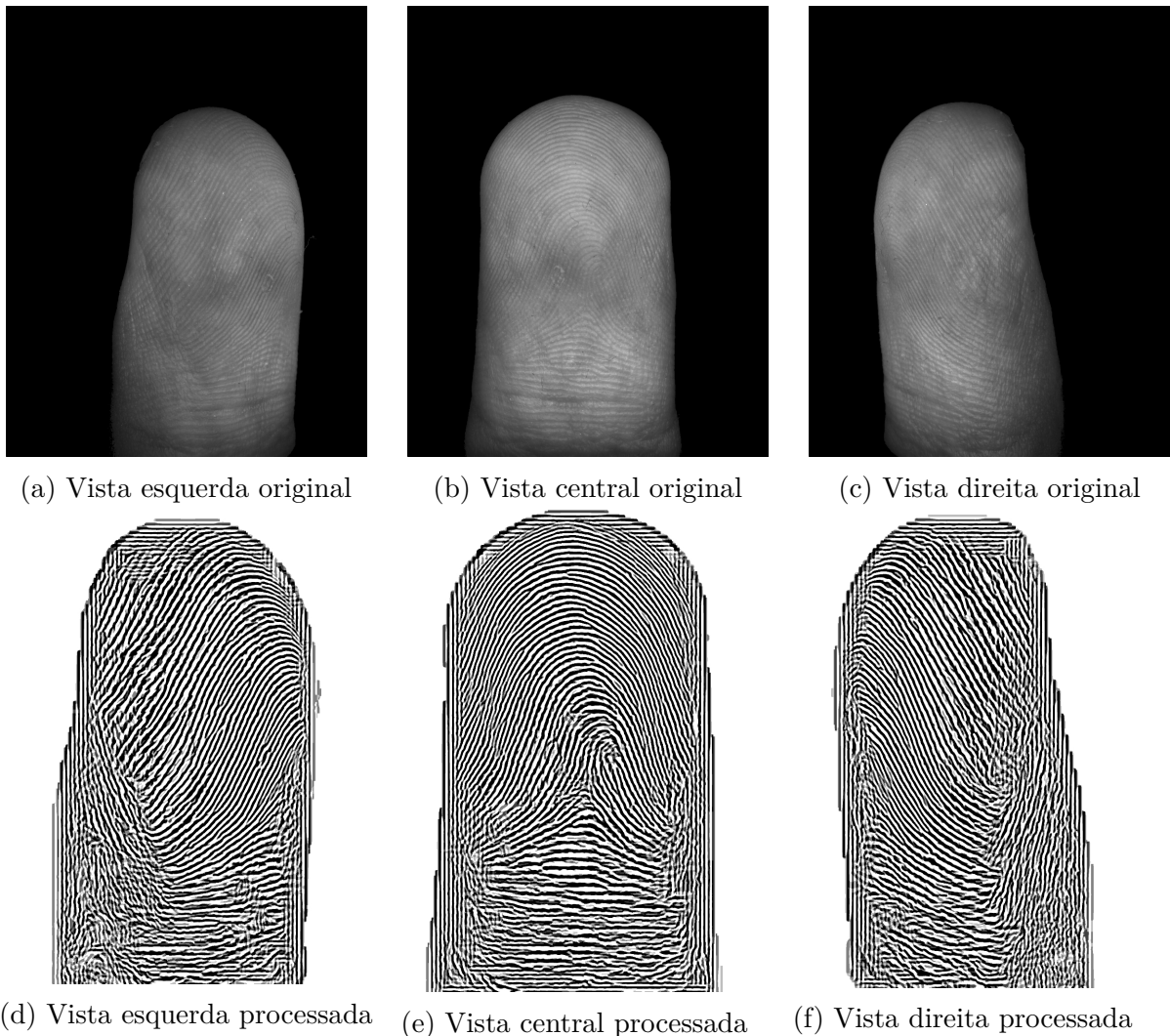


Figura 3.9: Exemplo das três vistas originais para uma mesma digital e o seu equivalente pós-processamento para o Grupo 5.

### 3.1.5 Grupo 6

Para o Grupo 6, analogamente ao que fizemos no Grupo 4, consideraremos as mesmas três vistas processada que obtivemos no Grupo 5, porém, com um recorte que privilegia a área de maior interesse.

Novamente, como no processamento das digitais do Grupo 4, antes do recorte, cada uma das três vistas passa por um processo de corte em que desconsideramos 20% da sua altura na parte de baixo. Para o recorte da digitais do Grupo 6, precisamos, também, espelhar as imagens correspondentes às vistas direitas, que passam a ser processadas de forma similar às vistas esquerdas. Após o espelhamento, as vistas laterais passam ainda por um novo recorte, que descarta os 10% mais à direita da imagem, evitando uma faixa de baixa qualidade que se forma nas laterais dos dedos.

Na divisão da digital em três vistas, precisamos ainda considerar que a distribuição da informação não acontece da mesma forma nas vistas laterais e na vista central. Enquanto na vista central o ponto de maior informação da digital se concentra no centro, nas vistas laterais esse ponto é deslocado para a lateral da imagem. Considerando essa realidade, para as digitais do Grupo 6, aplicamos recortes diferentes para as vistas centrais e laterais, como pode ser visto na Figura 3.10.

Para as vistas centrais, utilizamos o mesmo processo de recorte que utilizamos para as digitais do Grupo 4, descrito na Sessão 3.1.3. Para as vistas laterais, no entanto, consideramos o raio do círculo de recorte como sendo 75% da menor dimensão entre largura e altura da imagem. Além disso, nas vistas laterais, o centro do círculo de recorte não é posicionado no centro geométrico da imagem, mas sim na metade geométrica da lateral direita da imagem.

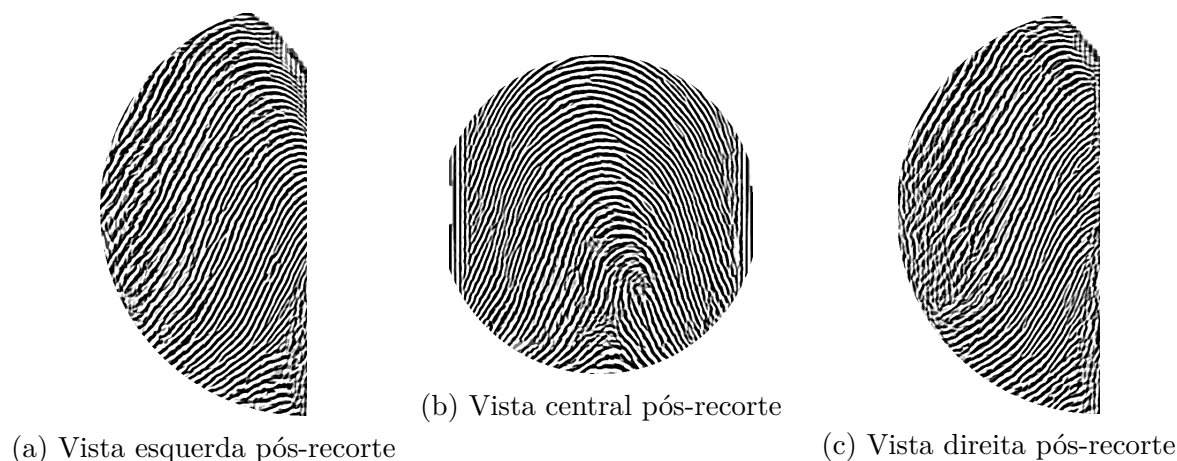


Figura 3.10: Exemplo dos equivalentes para o Grupo 6 das três vistas processadas na Figura 3.9.

## 3.2 Detecção de minúcias e casamento entre digitais

Após processadas, as imagens resultantes são passadas para um detector de minúcias, que examina os cumes da digital binarizada e procura por padrões como os descritos na Figura 2.13.

Para a detecção de minúcias, utilizamos o *mindtct*, o mesmo *software* empregado no processo de binarização das digitais coletadas pelo sensor sem contato. Após a detecção e processamento das minúcias, o *mindtct* armazena essas informações em um arquivo específico para cada imagem.

O casamento entre as impressões digitais é feito utilizando-se o *software bozorth3*, também fornecido pelo *National Institute of Standards and Technology*, que compara os arquivos de minúcias gerados pelo *mindtct*, dois a dois, e assinala um índice de similaridade para o par, ou seja, um valor numérico que reflete o nível de similaridade entre as digitais.

Para a avaliação dos grupos de digitais propostos, utilizamos o *mindtct* em cada uma das digitais processadas, montando bancos de dados de arquivos de minúcias para cada um dos seis grupos. Em seguida, utilizamos o *bozorth3* para fazer o casamento entre pares de digitais de um mesmo grupo, gerando uma tabela de valores de similaridade para cada par.

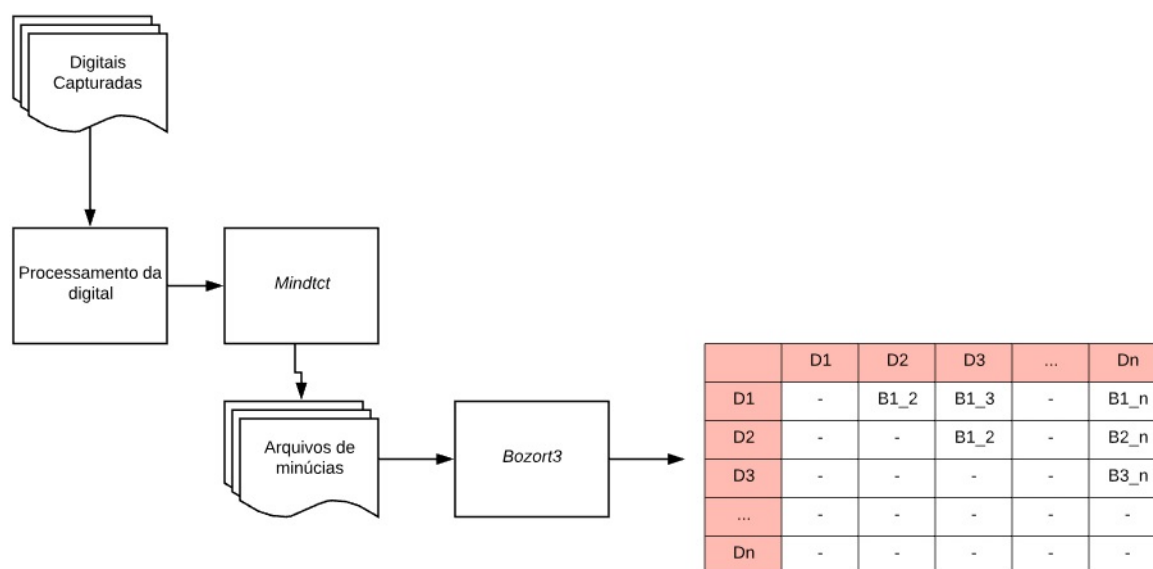


Figura 3.11: Esquemático de passos à serem seguidos na avaliação das digitais em um grupo.

Um esquemático desse processo pode ser visto na Figura 3.11. Nele, cada grupo de digitais é processado, tem suas características extraídas e é, então, avaliado em pares

pelo *Bozorth*. Na tabela resultante, montada pela aplicação do *Bozorth* individualmente em cada par de digitais, temos a combinação de  $n$  digitais, em que  $D1, D2, D3, \dots, Dn$  representam cada digital do banco e  $Bi\_j$  representa o valor gerado pelo *Bozorth* para a combinação das digitais de números  $i$  e  $j$  do banco. Note que os valores para  $B1\_1, B2\_2$  e  $B3\_3$  foram excluídos da tabela já que não há sentido em se comparar uma digital com ela mesma. Analogamente, os valores para  $B2\_1$  e  $B3\_2$  também foram suprimidos já que representam a mesma combinação que, respectivamente,  $B1\_2$  e  $B2\_3$ .

É importante frisar que, para as digitais dos Grupos 5 e 6, são geradas três tabelas de valores de similaridade já que as vistas não devem ser comparadas entre si. Dessa forma, cada vista central somente é comparada às outras vistas centrais e o mesmo vale para as vistas direitas e esquerdas.

### 3.3 Combinação de vistas

Nos Grupos 5 e 6, é necessário ainda a adição de uma última etapa, que consiste na combinação das tabelas de casamento das três vistas em uma tabela única. Como dito anteriormente, essa combinação é feita através de uma fórmula matemática, descrita pela Equação 3.2.

$$B_{combinada}(i, j) = P1 \times B_{esquerda}(i, j) + P2 \times B_{centro}(i, j) + P3 \times B_{direita}(i, j) \quad (3.2)$$

Nessa fórmula, temos que, para cada combinação de digitais de números  $i$  e  $j$  do banco, o valor das vistas combinado  $B_{combinada}(i, j)$  será dado pela soma dos valores para cada uma das três vistas, ( $B_{esquerda}(i, j)$ ,  $B_{centro}(i, j)$  e  $B_{direita}(i, j)$ ) multiplicados pelos seus respectivos pesos ( $P1, P2$  e  $P3$ ). A Figura 3.12 ilustra essa operação.

É importante notar que as tabelas de casamento para cada uma das vistas  $B_{esquerda}(i, j)$ ,  $B_{centro}(i, j)$  e  $B_{direita}(i, j)$  não se alteram durante toda a aplicação do algoritmo genético já que independem dos valores de  $P1, P2$  e  $P3$ .

Para encontrar os pesos  $P1, P2$  e  $P3$  que fornecessem o melhor resultado, utilizamos um algoritmo genético, como o descrito na Sessão 2.1.2 desse trabalho. Nesse algoritmo, consideramos que cada cromossomo é composto por três genes, sendo o primeiro gene referente ao valor  $P1$ , o segundo ao valor  $P2$  e o terceiro ao valor  $P3$ .

Na formação da população inicial, sorteamos valores aleatórios, entre 0 e 1, para  $P1, P2$  e  $P3$ , gerando um grupo de 500 cromossomos distintos. Para avaliação da aptidão desses indivíduos, multiplicamos cada gene pela sua respectiva tabela de casamento de

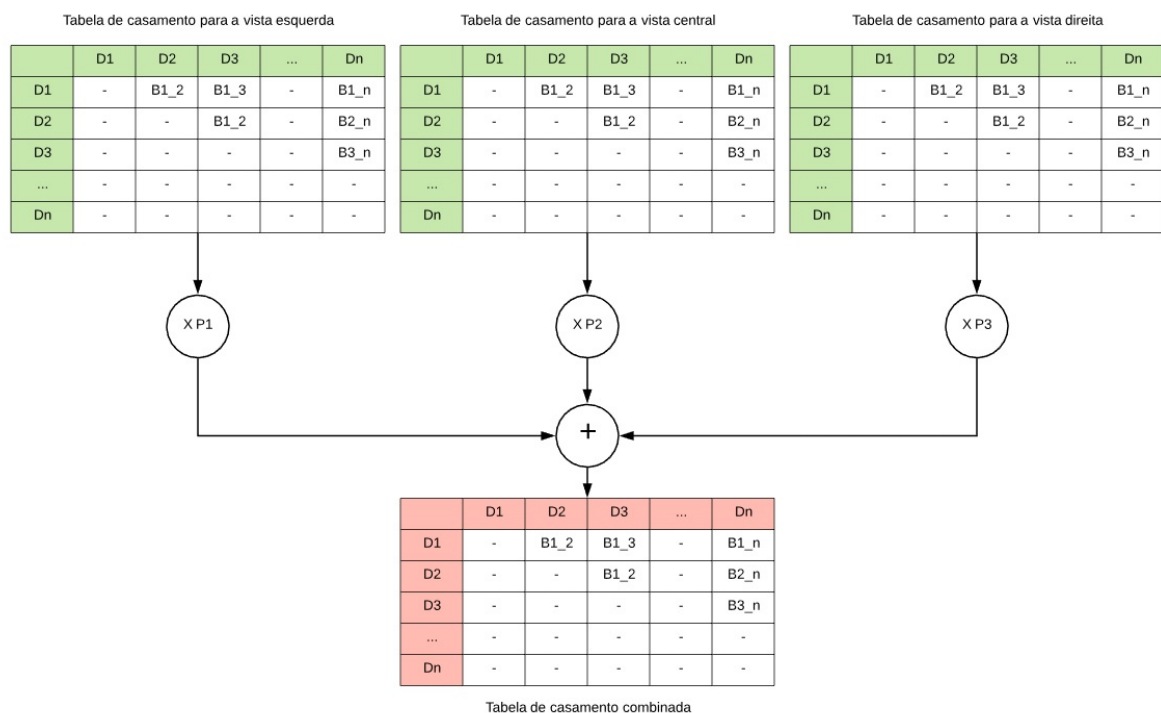


Figura 3.12: Representação do processo de combinação das tabelas de casamento das três vistas em uma tabela única.

vista, somamos as tabelas e aplicamos um algoritmo de aptidão à tabela resultante. Esse algoritmo de aptidão será apresentado na sessão 4.2 desse trabalho.

Após a análise de cada cromossomo através do algoritmo de aptidão, descartamos os 250 indivíduos menos adaptados. Dos 250 indivíduos restantes, 230 são combinados em pares aleatórios e utilizados para *crossover*. Nessa aplicação, o *crossover* pode ser de dois tipos, representados na Figura 3.13. O tipo do *crossover* é escolhido aleatoriamente.

Os últimos 20 cromossomos pais sofrem mutação, gerando novos indivíduos. Esse conjunto de 250 cromossomos pais, 230 cromossomos filhos por reprodução e 20 cromossomos filhos por mutação formam a nova população de indivíduos. Esse processo é repetido até que não haja mais variação considerável entre gerações e os pesos  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$  converjam para um valor próximo do ideal.

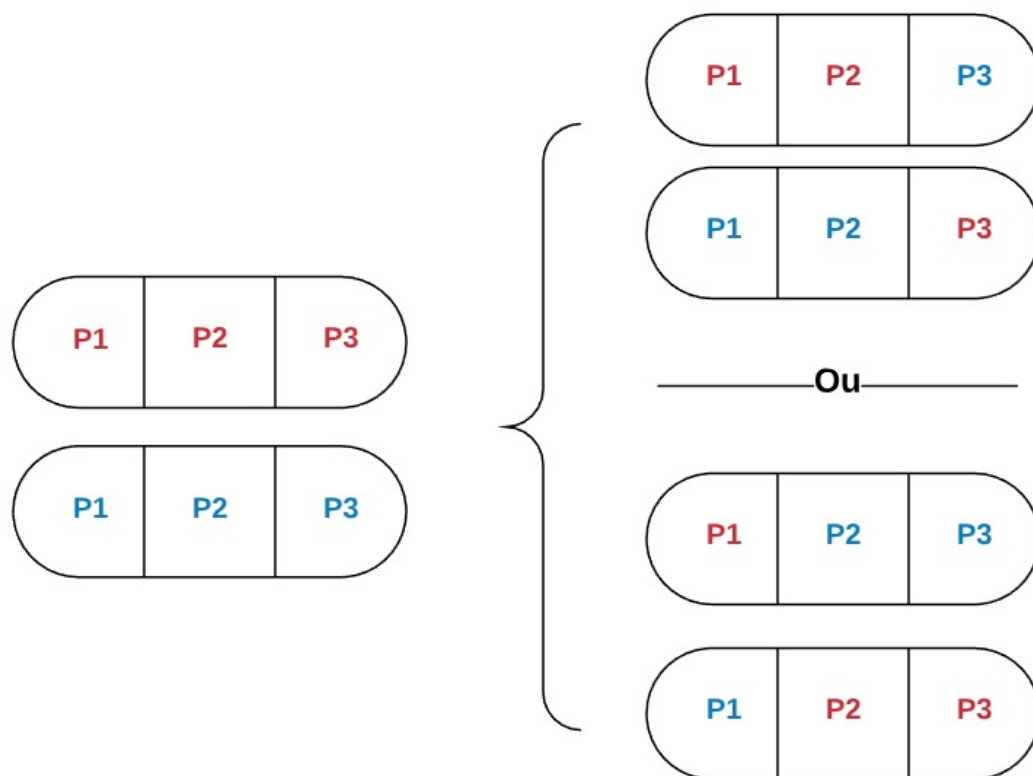


Figura 3.13: Representação dos dois tipos possíveis de *crossover*, partindo-se de cromossomos pais com três genes.

# Capítulo 4

## Resultados Experimentais

### 4.1 Base de Dados

Para a avaliação dos grupos descritos aqui, realizamos a coleta de uma base de dados de impressões digitais, composta tanto por digitais com contato quanto digitais sem contato. Para o sensor com contato, utilizamos um equipamento da empresa Akiyama, o mesmo empregado no cadastramento de biometrias para o Tribunal Superior Eleitoral brasileiro [28].

Na aquisição das digitais sem contato, foi escolhido um sensor multivista, fabricado pela marca suíça TBS, que opera pela captura simultânea de três câmeras, uma na parte central e duas nas laterais, anguladas em 45 e 315 graus [29]. A Figura 4.1 apresenta os dois tipos de sensores utilizados nesse trabalho.

A aquisição da base de dados foi toda feita no Laboratório de Imagens, Sinais e Acústica (LISA), da UnB, através da coleta das impressões digitais de voluntários. De cada voluntário, coletamos as seguintes medidas de impressões digitais:

- Para cada um dos dez dedos das mãos, cinco digitais simples capturadas utilizando-se o sensor com contato da Akiyama.
- Para cada um dos dez dedos das mãos, cinco digitais capturadas utilizando-se o sensor sem contato da TBS.
- Para cada um dos dez dedos das mãos, uma digital rolada, capturada utilizando-se o sensor com contato da Akiyama. Nesse tipo de digital, o dedo é colocado de lado sobre o sensor de captura e é, então, rolado lentamente de um lado à outro do sensor para que uma área maior seja capturada.

Cada voluntário contribuiu, portanto, com cinquenta digitais sem contato, cinquenta digitais simples com contato e dez digitais roladas com contato, totalizando cento e dez



(a) Sensor da Akiyama utilizado na captura de digitais com contato (b) Sensor da TBS utilizado na captura de digitais sem contato

Figura 4.1: Sensores utilizados na coleta da base de dados

digitais no total. Se contarmos que cada digital coletada pelo sensor sem contato é composta de três vistas e uma digital planejada, esse número sobe para duzentos e sessenta digitais. O processo de coleta de todas as digitais levou em torno de quarenta minutos por voluntário. A Figura 4.2 apresenta um exemplo de cada um dos três tipos de digitais capturadas.

A base de dados utilizada nesse trabalho conta com digitais de vinte voluntários diferentes, totalizando mil digitais simples com contato, mil digitais capturadas pelo sensor sem contato e 200 digitais roladas.

Para a avaliação dos grupos descritos nesse trabalho, consideramos cada dedo como um usuário distinto, sem relação com os outros. Dessa forma, trabalhamos com uma base composta por duzentos usuários (dez dedos de vinte pessoas), cada um com cinco digitais sem contato, cinco digitais com contato e uma digital com contato rolada cadastradas.

## 4.2 Combinação das vistas

Para a definição dos pesos  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$  utilizados na combinação matemática das três vistas adquiridas pelo sensor de digitais sem contato utilizamos um algoritmo genético simples, como descrito na Sessão 3.3 desse trabalho.





(a) Exemplo de digital capturada através do sensor da TBS.



(b) Exemplo de digital rolada capturada através do sensor da Akiyama.



(c) Exemplo de digital simples capturada através do sensor da Akiyama.

Figura 4.2: Sensores utilizados na coleta da base de dados

Tabela 4.1: Pesos obtidos pela aplicação do algoritmo genético para os grupos 5 e 6..

	Gerações	Tempo de processamento	P1	P2	P3
<b>Grupo 5</b>	170	24 horas	0.1057	0.1420	0.1665
<b>Grupo 6</b>	170	25 horas	0.1825	0.7207	0.3059

Para ambos os grupos (5 e 6), o algoritmo simulou um total de 170 gerações e, após esse tempo, os cromossomos resultantes apresentaram valores pouco variantes para  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$ . Os valores finais desses pesos para cada grupo, correspondentes aos indivíduos mais adaptados da população, estão apresentados na Tabela 4.1.

### 4.3 Algoritmo de Monte Carlo

Para avaliar o desempenho do algoritmo de casamento em cada um dos grupos propostos, montamos a tabela de casamento, calcularemos as taxas de falso positivo e falso negativo para cada valor possível de limiar e encontraremos o EER, como descrito na Sessão 2.1.5 desse trabalho. Partimos do princípio, portanto, de que um EER mais baixo representa um sistema com menores taxas de erro e, portanto, mais robusto.

Como trabalhamos com a proporção de 5 digitais de um mesmo indivíduo para cada 995 digitais de outros, não basta realizar o casamento entre todas as digitais e calcular o EER a partir da tabela completa de casamentos gerada. Se a avaliação do sistema fosse feita dessa maneira, teríamos uma proporção de 199 possíveis falsos positivos para cada possível falso negativo, o que deslocaria as taxas de erro e poderia levar a definição de um EER falso.

Para resolver esse problema e avaliar corretamente o desempenho do sistema de reconhecimento de digitais para os grupos propostos, utilizaremos o algoritmo de Monte Carlo proposto por [30]. Por esse algoritmo, a avaliação é feita seguindo-se os seguintes passos:

1. Considere  $F$  como sendo o conjunto de amostras disponíveis para análise. Inicialmente, o grupo  $F$  contém todas as 1000 amostras dos 200 indivíduos disponíveis no banco. Se o grupo  $F$  estiver vazio, ele volta a ter todas as 1000 amostras disponíveis.
2. Escolhemos 20 indivíduos aleatoriamente. Todas as amostras desses indivíduos são retiradas do conjunto  $F$  e adicionadas a um conjunto  $D_k$  de digitais em análise.
3. Considere  $f_{ij}$  como sendo a amostra de número  $j$  do indivíduo  $i$  presente em  $D_k$ .
4. Nesse passo, cada amostra  $\{f_{ij}\}_{i=n,j=m}$  é comparada a todas as outras amostras tais que  $\{f_{ij}\}_{i>n,j=m}$ , com  $n$  variando entre 1 e 19 e  $m$  sendo um valor fixo entre 1 e 5. Em outras palavras, comparamos todas as amostras de número  $m$  de todos

os indivíduos entre si. Esse processo é representado pelo casamento horizontal na Figura 4.3.

5. Nesse passo, cada amostra  $\{f_{ij}\}_{i=n,j=m}$  é comparada à todas as outras amostras tais que  $\{f_{ij}\}_{i=n,j>m}$ , com  $n$  variando entre 1 e 20 e  $m$  variando entre 1 e 4. Em outras palavras, todas as amostras de um mesmo indivíduo, para os 20 indivíduos, são comparadas entre si. Esse processo é representado pelo casamento vertical na Figura 4.3.
6. Calcula-se, então, o EER para as combinações definidas nos passos 4 e 5.
7. O passo cinco é repetido novamente, com  $m$  sendo definido para um novo valor. As combinações obtidas no passo cinco são, novamente, combinadas às combinações obtidas no passo seis e um novo EER é calculado. Isso se repete para cada um dos cinco valores possíveis de  $m$ , gerando cinco EER diferentes.
8. O grupo  $D_k$  é esvaziado, o processo retorna ao primeiro passo e é repetido 400 vezes, gerando 2000 valores de EER. É importante lembrar que o conjunto  $F$  não contém mais os indivíduos já analisados.

Ao considerarmos somente as combinações descritas no passo 5, temos um grupo de 190 casamentos que podem resultar em falsos positivos (combinação de 20 amostras tomadas 2 a 2). Por sua vez, as combinações descritas no passo 6 somam 200 casamentos que podem resultar em falsos negativos (combinação de 5 amostras tomadas 2 a 2 e multiplicadas por 20). A comparação desses dois grupos de tamanhos similares resolve a disparidade entre a quantidade de FP e FN, melhorando a assertividade do algoritmo.

Ao final, os 2000 valores de EER são colocados em um gráfico e o resultado final é dado pelo EER médio e o respectivo desvio padrão calculado.

Esse algoritmo de Monte Carlo é utilizado, também, como algoritmo de aptidão para o algoritmo genético que define os pesos na combinação das vistas. Nesse caso, para cada cromossomo a tabela de casamento combinada é produzida e utilizada como entrada para o Monte Carlo. O EER médio é, então, utilizado como medida de aptidão do indivíduo.

A aplicação do algoritmo de Monte Carlo aos seis grupos pré-definidos produziu os resultados apresentados na Tabela 4.2 e os seguintes gráficos apresentados na Figura 4.4. Além disso, aplicamos o algoritmo de Monte Carlo às tabelas correspondentes de cada uma das três vistas, com e sem recorte. O resultado desse teste pode ser conferido na Tabela 4.3.

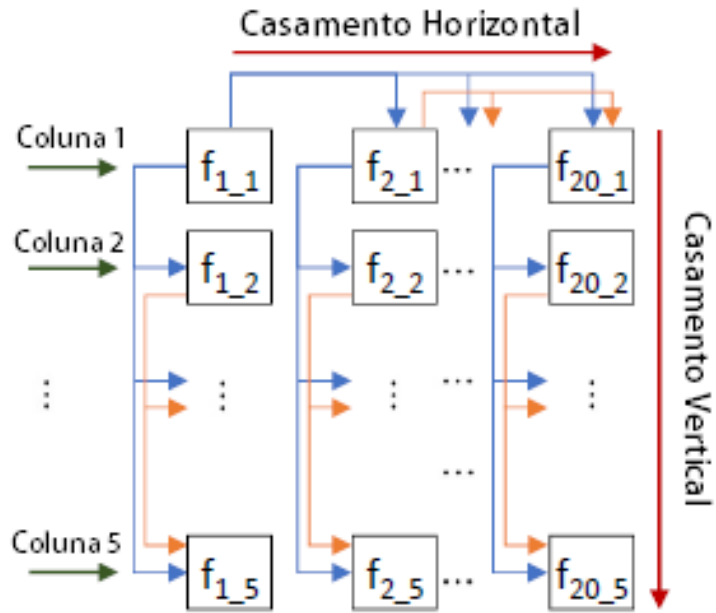


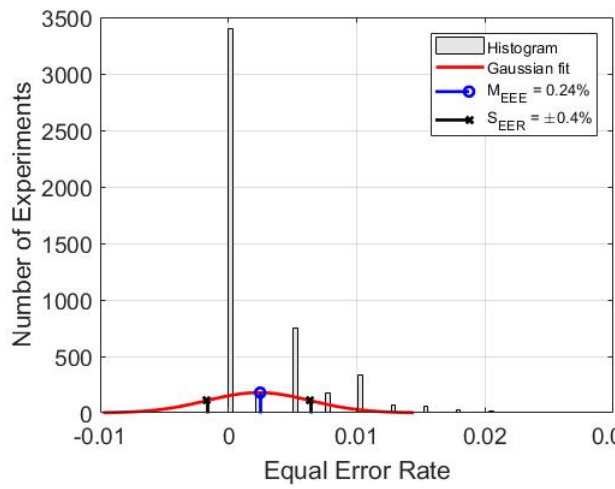
Figura 4.3: Representação do casamento horizontal e vertical no algoritmo de Monte Carlo utilizado.

Tabela 4.2: Resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Monte Carlo para cada um dos seis grupos previamente definidos.

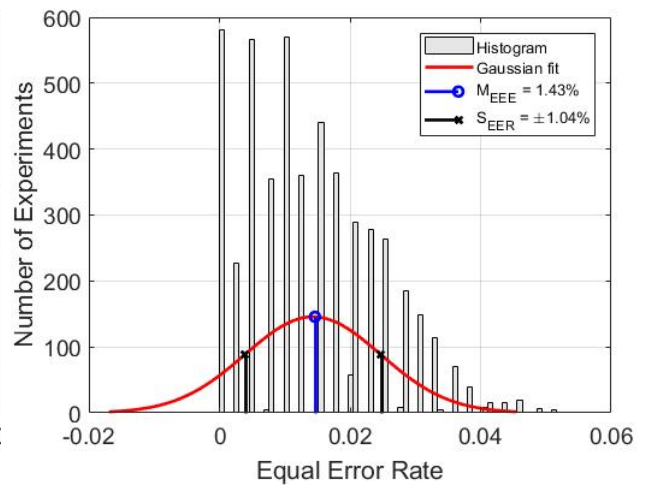
	<b>EER</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Grupo 1</b>	0.24%	0.4%
<b>Grupo 2</b>	1.43%	1.04%
<b>Grupo 3</b>	10.51%	2.51%
<b>Grupo 4</b>	6.46%	1.98%
<b>Grupo 5</b>	6.31%	2.02%
<b>Grupo 6</b>	4.78%	1.73%

Tabela 4.3: Resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Monte Carlo à cada uma das vistas separadamente.

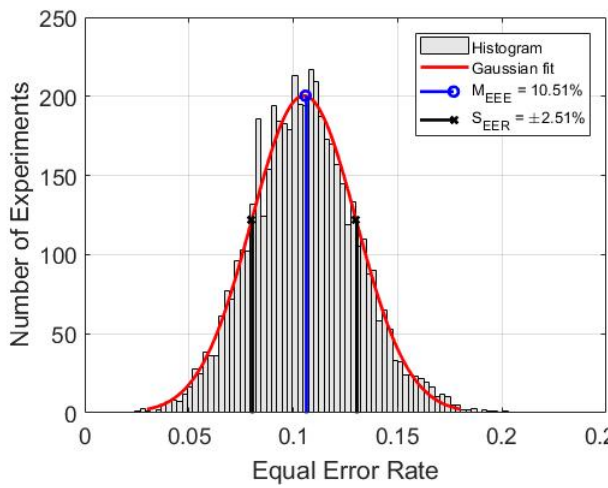
	<b>EER Esquerda</b>	<b>EER Centro</b>	<b>EER Direita</b>
<b>Grupo 5</b>	15.72%	10.51%	16.41%
<b>Grupo 6</b>	14.6%	6.46%	14.4%



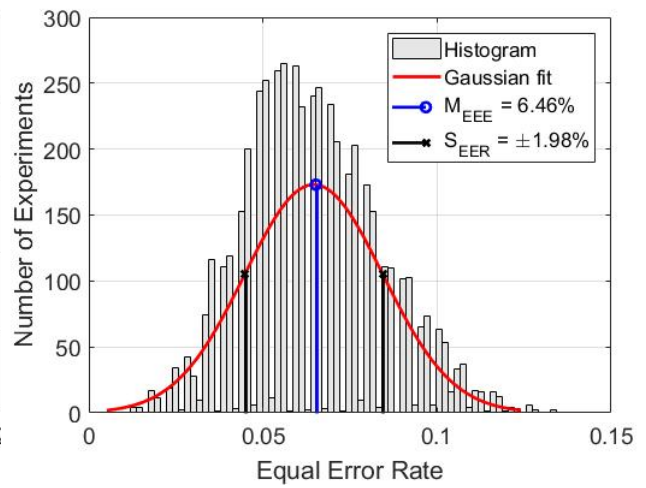
(a) Grupo 1



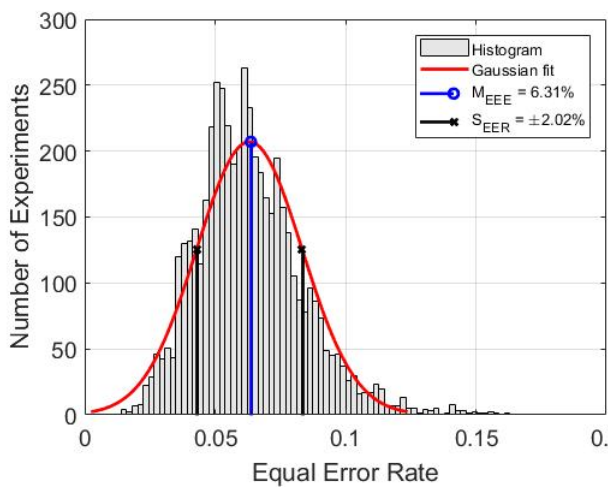
(b) Grupo 2



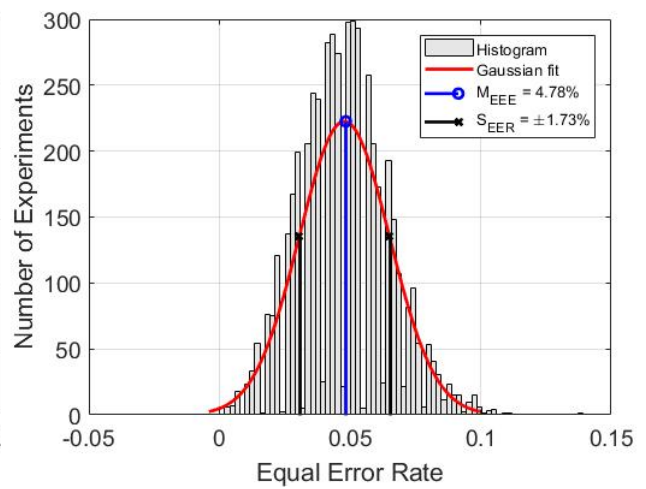
(c) Grupo 3



(d) Grupo 4



(e) Grupo 5



(f) Grupo 6

Figura 4.4: Gráficos gerados pela aplicação do algoritmo de Monte Carlo à cada grupo.

# Capítulo 5

## Conclusão

A partir dos resultados obtidos e compilados na Tabela 4.2, podemos montar uma linha de desempenho dos grupos, partindo do grupo com melhor desempenho para o grupo com pior desempenho, como descrita na Equação 5.1.

$$G1 > G2 > G6 > G5 > G4 > G3 \quad (5.1)$$

Através da análise dos dados obtidos, possuímos, então, informações suficientes para refutar ou validar as hipóteses propostas na introdução desse trabalho. São elas:

1. Algum dos grupos formados pelas digitais capturadas pelo sensor de digitais sem contato (Grupos 2, 3, 4, 5 e 6) obtém desempenho melhor do que o Grupo 1.
2. Os Grupos 5 e 6 produzem resultados melhores que, respectivamente, os Grupos 3 e 4.
3. Os Grupos 4 e 6 possuem desempenho melhor do que, respectivamente, os Grupos 3 e 5.
4. O Grupo 6 possui desempenho melhor do que o Grupo 2.

### 5.1 Hipótese 1

Pela observação da linha de desempenho apresentada na Equação 5.1, fica bastante claro que nenhum dos grupos compostos pelas digitais capturadas com o sensor sem contato foi capaz de superar o desempenho obtido pelo Grupo 1, composto pelas impressões digitais com contato. Isso mostra que ainda há espaço para melhorias nos algoritmos de casamento e de processamento para digitais sem contato. Apesar disso, o Grupo 2, composto pelas impressões sem contato planificadas, teve um desempenho bastante baixo e razoavelmente

próximo do Grupo 1, o que poderia justificar a sua utilização em aplicações comerciais. Com isso, podemos dizer que a hipótese 1 está refutada para esse trabalho.

## 5.2 Hipótese 2

Pela análise da Tabela 4.2 e da Tabela 4.3 é possível notar que a combinação proposta das vistas obteve resultados melhores em comparação aos resultados obtidos pela aplicação do algoritmo às vistas separadas. Para o Grupo 5, sem recorte, a combinação das vistas foi capaz de reduzir o EER de 10.51%, referente a vista central, para 6.31%, referente as três vistas combinadas. No Grupo 6, com recorte, esse mesmo EER foi reduzido de 6.46% para 4.78%. Esses resultados provam que o método de combinação proposto é superior a análise das vistas em separado, o que comprova a hipótese 2.

## 5.3 Hipótese 3

Pela análise dos resultados obtidos, podemos perceber que o Grupo 3 apresentou um EER médio de 10.51% enquanto, no Grupo 4, esse valor foi reduzido para 6.46%. Analogamente, temos que o Grupo 5 apresentou um EER médio de 6.31%, superior ao EER de 4.78% alcançado pelo Grupo 6. Esses resultados provam quem o método de recorte proposto para valorização das áreas de interesse nas digitais é, de fato, capaz de privilegiar as áreas de alta qualidade, diminuindo o EER médio e comprovando a teoria 3. Esse resultado é apoiado também pela diminuição dos EER para as três vistas com recorte, em relação às vistas sem recorte, como apresentado na Tabela 4.3

## 5.4 Hipótese 4

A partir da análise da Tabela 4.2 podemos perceber que o método proposto nesse trabalho, apesar de apresentar resultados promissores, não é capaz de superar o desempenho obtido pelas digitais planejadas criadas pelo *driver* da TBS. A hipótese 4 está, portanto, refutada para esse trabalho.

## 5.5 Considerações Finais

Apesar da solução proposta de combinação de vistas não ter sido capaz de superar o desempenho dos Grupos 1 e 2, refutando as hipóteses 1 e 4, a comprovação das hipóteses 2 e 3 deixa claro que o método possui validade e é capaz de melhorar o desempenho das digitais analisadas.

## 5.6 Trabalhos Futuros

Um dos problemas encontrados durante a produção desse trabalho foi definir corretamente a localização do centro da digital durante a etapa de recorte. Como a base de dados utilizada contém amostras de todos os dedos, os tamanhos e formatos das digitais variam muito, prejudicando a definição de um centro único que funcione para todas. A Figura 5.1 exemplifica esse problema.

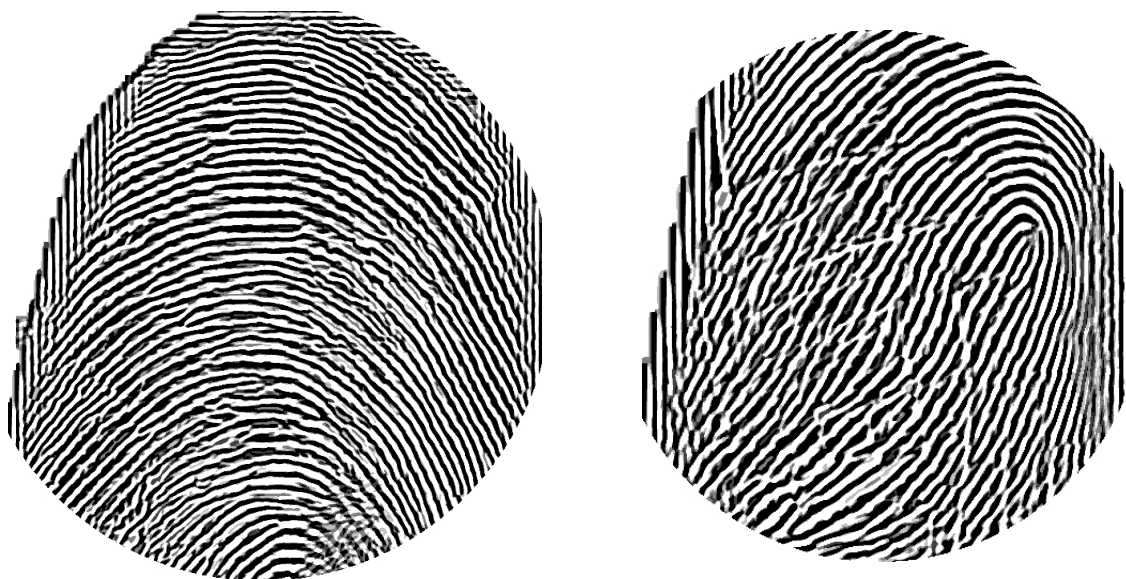


Figura 5.1: Exemplos de digitais em que uma definição errada do centro gerou um recorte de baixa qualidade.

Uma forma de melhorar o desempenho do método em trabalho futuros seria a utilização de um algoritmo detector de centro nas digitais que funcionasse em cada uma das três vistas e em tipos de dedos diferentes como, por exemplo, os algoritmos apresentados em [31] e [32].

Em termos de análise comparativa, uma possível abordagem futura seria a divisão da base do dado em tipos de dedo (polegar, indicador e etc) e a comparação do desempenho de cada um dos seis grupos para cada dedo. Dessa forma, seria possível visualizar em quais dedos o sistema proposto encontra uma maior dificuldade para apresentar bons resultados.



# Referências

- [1] Gonzales, Rafael C. e Richard E. Woods: *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, NJ, USA, 2002. 7
- [2] Bovik, Al: *The Essential Guide to Image Processing*. Elsevier, CA, USA, 2009. 8, 12
- [3] Kasabov, Nikola K.: *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering*. The MIT Press, MA, USA, 1996. 13, 16
- [4] MathWorks: *How the genetic algorithm works*. <https://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>, 2018. 15
- [5] Motwani, Rajeev e Prabhakar Raghavan: *Randomized Algorithms*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1995, ISBN 0-521-47465-5, 9780521474658. 16
- [6] Wayman, James L.: *A definition of biometrics*. National Biometric Test Center Collected Works 1997 - 2000, San Jose State University, 2000. 17, 25
- [7] Wayman, James L.: *Fundamentals of biometric authentication technologies*. Int. J. Image Graphics, 1(1):93–113, 2001. <https://doi.org/10.1142/S0219467801000086>. 17
- [8] Wayman, James L.: *Technical testing and evaluation of biometric identification devices*. Springer, London, UK, 1996. 17
- [9] Jain, A. K., A. Ross e S. Prabhakar: *An introduction to biometric recognition*. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 14(1):4–20, Jan 2004, ISSN 1051-8215. 20
- [10] Ross, Arun e Anil K. Jain: *Human recognition using biometrics: an overview*. Annales Des Télécommunications, 62(1):11–35, Jan 2007, ISSN 1958-9395. <https://doi.org/10.1007/BF03253248>. 22
- [11] Moenssens, Andre A: *Fingerprint techniques*. Philadelphia : Chilton Book Co, [1st ed.] edição, 1971, ISBN 0801955270. 23, 25
- [12] Lee, H.C. e R.E. Gaensslen: *Advances in fingerprint technology*. CRC series in forensic and police science. CRC Press, 1991, ISBN 9780849395130. <https://books.google.com.br/books?id=jfgTAQAAMAAJ>. 23, 24
- [13] Henry, Faulds: *On the skin-furrows of the hand*. Nature, 22(574):605, oct 1880. 24

- [14] Galton, F.: *Fingerprints*. W.S. Hein, 1892, ISBN 9781575887425. <https://books.google.com.br/books?id=1MHpNMy3V1oC>. 24
- [15] Henry, E.R.: *Classification and Uses of Finger Prints*. Making of modern law. George Routledge and Sons, 1900. <https://books.google.com.br/books?id=P709AAAAIAAJ>. 24
- [16] Prabhakar, Salil: *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*. Tese de Doutorado, East Lansing, MI, USA, 2001, ISBN 0-493-50031-6. AAI3036734. 25
- [17] Maltoni, Davide, Dario Maio, Anil K. Jain e Salil Prabhakar: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, London, UK, 2009. 25
- [18] Genovese, A., E. Muñoz, V. Piuri, F. Scotti e G. Sforza: *Towards touchless pore fingerprint biometrics: A neural approach*. Em *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, páginas 4265–4272, July 2016. 27
- [19] Cui, J., M. Ra e W. Kim: *Fingerprint pore matching method using polar histogram*. Em *The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)*, páginas 1–2, June 2014. 27
- [20] Champod, Christophe.: *Fingerprints and other ridge skin impressions / Christophe Champod ... [et al.]*. CRC Press Boca Raton, FL, 2004. 27
- [21] Parziale, Geppy: *Touchless Fingerprinting Technology*, páginas 25–48. Springer London, London, 2008, ISBN 978-1-84628-921-7. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-921-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-921-7_2). 31
- [22] Lee, Chulhan, Sanghoon Lee e Jaihie Kim: *A study of touchless fingerprint recognition system*. Em Yeung, Dit Yan, James T. Kwok, Ana Fred, Fabio Roli e Dick de Ridder (editores): *Structural, Syntactic, and Statistical Pattern Recognition*, páginas 358–365, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg. 32
- [23] Zaghetto, C., A. Zaghetto, F. d. B. Vidal e L. H. M. Aguiar: *Touchless multiview fingerprint quality assessment: rotational bad-positioning detection using artificial neural networks*. Em *2015 International Conference on Biometrics (ICB)*, páginas 394–399, May 2015. 33
- [24] Franco, Pedro Salum: *Método para Compatibilidade entre Impressões Digitais com e sem contato*. Universidade de Brasília, UnB, Brasil, 2014. 33, 36, 39
- [25] Labati, R. Donida, A. Genovese, V. Piuri e F. Scotti: *Toward unconstrained fingerprint recognition: A fully touchless 3-d system based on two views on the move*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 46(2):202–219, Feb 2016, ISSN 2168-2216. 34
- [26] Liu, F., D. Zhang, C. Song e G. Lu: *Touchless multiview fingerprint acquisition and mosaicking*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(9):2492–2502, Sept 2013, ISSN 0018-9456. 34

- [27] Watson, Craig I., Michael D. Garriss, Elham Tabassi, Charles L. Wilson, R. Michael McCabe, Stanley Janet e Kenneth Ko: *User's guide to nist biometric image software (nbis)*. 38
- [28] *TSE acquire Kits para implementar biometria em todo o país, how-published* = <https://tse.jusbrasil.com.br/noticias/2994719/tse-acquire-kits-para-implementar-biometria-em-todo-o-pais>, note = *Acesso: 30-07-2018*. 48
- [29] *TBS Biometrics - 3D Terminal*. <https://www.tbs-biometrics.com/en/3d-terminal-device-detail/>. Acesso: 30-07-2018. 48
- [30] Zaghetto, Alexandre e Lécio Pery: *Touchless fingerprint matching using fingercodes in comparisson to minutia-based approach*. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018. 51
- [31] Mao, K., G. Wang, Y. Jin e C. Yu: *Using genetic algorithms for fingerprint core point detection*. Em *2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, volume 4, páginas 20–24, Aug 2009. 57
- [32] Kekre, H. B. e V. A. Bharadi: *Fingerprint's core point detection using orientation field*. Em *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*, páginas 150–152, Dec 2009. 57